

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

Université Abderrahmane Mira-Bejaia



Faculté Technologie

Département de Génie électrique

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechniques

Option : Commande électrique

Thème

Etude de l'impact d'intégration des panneaux photovoltaïques sur les véhicules électriques

Présenté par :

M^{elle} : Bouloufat Loubna

M^{elle} : Idir Ikram

Encadré par

M^r: Djermouni Kamel

Année universitaire

2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : Idir

Prénom : Jkram

Matricule : 1919 33 00 76 62

Spécialité et/ou Option : Commande électrique

Département : Créne Electrique

Faculté : Science et Technologies

Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) :

Intitulé : Etude de dim part d'intégration des
..... Panneaux photovoltaïques sur les véhicules
..... électriques

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
09/07/2024

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

..... [Signature]

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : Bouloufat

Prénom : Loubna

Matricule : 19 19 33 00 76 83

Spécialité et/ou Option : Commande électronique

Département : Génie électronique

Faculté : Science et technologies

Année universitaire : 2024./2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) :

Intitulé : Etude de l'impact d'intégration des
Panneaux photovoltaïques sur les véhicules
électrique

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le

09/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Remerciements

On tient tout d'abord à remercier DIEU, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la santé nécessaire pour mener à bien ce travail.

On remercie sincèrement mon encadrant M^r DJERMOUNI Kamel pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa disponibilité et sa bienveillance tout au long de ce travail.

On remercie l'ensemble des membres jury d'avoir acceptés et juger notre travail.

Merci infiniment à tous ceux qui ont apporté leur aide à la réalisation de ce travail

Dédicaces

Un grand plaisir que je dédie ce modeste travail :

À l'être le plus cher de ma vie, ma mère.

A celui qui a fait de moi une femme, **mon père**, sagesse et de force.

A mes chères **sœurs** et mon **frère**, piliers de mon équilibre

A mon **mari**, pour son soutien

A toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

A tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom
BOULOUFAT.

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

A celle qui a partagé ce travail avec moi.

BOULOUFAT Loubna

Il nous est agréable de dédier ce modeste travail à :

Nous chers parente qui nous ont soutenu.

Tout au long cursus, nos familles est nos proches.

Ainsi qu'à tous ceux qui nous sont chers.

Idir Ikram

Table des matières

Table des matières i

Liste des figures ii

Liste des tableaux vii

Liste des symboles ix

Abréviations et définitions xi

Introduction générale

Chapitre I

 Introduction 1

 Véhicules électriques rechargeables 1

 Historique VER..... 2

 Types de véhicule électrique rechargeable..... 3

 Composant principaux d’un VER 4

 Les convertisseurs de puissance..... 8

 Fonctionnement générale d’un VER..... 10

 Véhicule électrique à panneau solaire..... 11

 Avantages et inconvénient des véhicules électriques..... 15

 Conclusion 16

Chapitre II

 Introduction 17

 Dynamique de véhicule électrique..... 17

 Modélisation d’un générateur photovoltaïque..... 23

 Modélisation de la batterie..... 26

 Conclusion 28

Chapitre III

 Introduction 29

 Simulation et interprétation des résultats 29

 Conclusion 67

Conclusion générale 68

Liste des figures

Figure I.1 Système d'entraînement d'un VER	4
Figure I.2 Principe de fonctionnement de la plie à combustible	6
Figure I. 3 Composant Principaux du VE.....	7
Figure I.4 Emplacement de la batterie du VE	7
Figure I.5 Classification des motorisations des VE.....	8
Figure 1.6 Ensemble convertisseur machine triphasé.....	10
Figure I.7 Schéma de principe d'un hacheur parallèle (BOOST)	11
Figure I.8 Principe de la commande.....	11
Figure I.9 Courbe de puissance du générateur photovoltaïque.....	12
Figure I.10 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O).....	12
Figure I.11 Véhicule électrique à panneau solaire HYUNDAI-ioniq5	14
Figure I.12 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	15
Figure I.13 La carte d'éclairement solaire de l'Algérie.....	17
Figure II.1 Modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque	24
Figure II.2 Schéma bloc d'un générateur photovoltaïque	26
Figure II.3 Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation	26
Figure II.4 Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation	27
Figure II.5 Modèle électrique équivalent d'une batterie	27
Figure II.6 L'évolution de la tension	29
Figure III.1 Profil de vitesse de véhicule et de vent en fonction de temps	31
Figure III.2 Variation de l'ensoleillement en fonction de temps	31
Figure III.3 Pente de la route en fonction de	31
Figure III.4 Variation de température en fonction de temps	32
Figure III.5 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps	32
Figure III.6 Couple développé par moteur en fonction de temps.....	32
Figure III.7 Tension optimal appliquée par les panneaux photovoltaïques	33

Figure III.8 Courant optimal délivrée par les panneaux photovoltaïques.....	33
Figure III.9 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques	33
Figure III.10 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique.....	34
Figure III.11 Variation de l'ensoleillement en fonction de temps	35
Figure III.12 Tension optimal appliquée par les panneaux photovoltaïques	35
Figure III.13 Courant optimal délivrée par les panneaux photovoltaïques.....	35
Figure III.14 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques	36
Figure III.15 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique.....	36
Figure III.16 Variation de L'ensoleillement en fonction de temps.....	37
Figure III.17 Tension optimal appliquée par les panneaux photovoltaïques	37
Figure III.18 Courant optimal délivrée par les panneaux photovoltaïques.....	37
Figure III.19 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques	38
Figure III.20 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique	38
Figure III.21 Profils des vitesses de véhiculeet de vitesse de vent en fonction de temps.....	39
Figure III.22Variation de température en fonction de temps	39
Figure III.23 Variation de pente de la route en fonction de temps	40
Figure III.24 Couple developé par moteur en fonction de temps	40
Figure III.25Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps	40
Figure III.26 Tension optimal appliquée par les panneaux photovoltaïques	40
Figure III.27 Courant optimal délivrée par les panneaux	41
Figure III.28 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques	41
Figure III.29 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique.....	41
Figure III.30 Tension optimal appliquée par les panneaux photovoltaïques	43
Figure III.31 Courant optimal délivrée par les panneaux	43

Figure III.32 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques	43
Figure III.33 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique.....	44
Figure III.34 Tension optimal appliquée par les panneaux photovoltaïques	45
Figure III.35 Courant optimal délivrée par les panneaux photovoltaïques.....	45
Figure III.36 Puissance délivrée par les panneaux	45
Figure III.37 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique.....	46
Figure III. 38 Profil de vitesse véhicule et vitesse du vent en fonction de temps.....	47
Figure III.39 Variation de pente de la route en fonction de temps	47
Figure III.40 Couple Figure développé par moteur en fonction de temps.....	47
Figure III.41 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps ..	48
Figure III.42 Tension optimal appliquée par les panneaux photovoltaïques	48
Figure III.43 Courant optimal délivré par les panneaux photovoltaïques.....	48
Figure III .44 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques	49
Figure III.45 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique.....	49
Figure III.46 Tension optimal appliquée par les panneaux photovoltaïques	50
Figure III.47 Courant optimal délivrée par les panneaux	50
Figure III.48 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques	50
Figure III.49 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique.....	51
Figure III.50 Variation de l'ensoleillement en fonctionne de temps	52
Figure III.51 Variation de la température en fonctionne de temps	52
Figure III.52 Etat de chargement de groupe de batteries en fonctionne de temps.....	53
Figure III.53 Tension optimal appliquée par les panneaux photovoltaïques	53
Figure III.54 Courant optimal délivré par les panneaux photovoltaïques	53
Figure III.55 Puissance délivré par les panneaux photovoltaïques.....	54

Figure III.56 Profils de vitesse de véhicule et de vitesse de vent en fonction de temps.....	55
Figure III. 57 Etat de charge des batteries de véhicule en fonction de temps.....	55
Figure III.58 La pente de la route en fonction de temps.....	56
Figure III.59 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps...	56
Figure III.60 Couple développé par moteur en fonction de temps	56
Figure III. 61 Variations de la température en fonction de temps.....	57
Figure III.62 Variations de l'ensoleillement en fonction de temps.....	57
Figure III.63 Puissance optimale délivrée par les panneaux photovoltaïques	57
Figure III.64 Tension appliquée aux bornes des batteries de véhicule en fonction de temps.....	58
Figure III.65 Courant fourni /absorbé par la batterie en fonction de temps	58
Figure III.66 Evolution du signal dDg (rapport cyclique appliqué par la commande MPPT) en fonction de temps.....	58
Figure III.67 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique.....	59
Figure III.68 Profils des vitesses de véhicule et de vent en fonction de temps	61
Figure III.69 Etat de chargement de groupe de batteries en fonction de temps.....	61
Figure III.70 La pente de la route en fonction de temps.....	61
Figure III. 71 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps ..	62
Figure III.72 Couple développé par moteur en fonction de temps	62
Figure III. 73 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques	62
Figure III.74 Tension appliquée aux bornes des batteries de véhicule en fonction de temps.....	63
Figure III.75 Courant fourni /absorbé par la batterie en fonction de temps	63
Figure III.76 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique.....	63
Figure III.77 Profils des vitesses de véhicule et de vent en fonction de temps	65
Figure III.78 Etat de chargement de groupe de batteries en fonction de temps.....	65

Figure III.79 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps...	69
Figure III.80 Couple développé par moteur en fonction de temps	66
Figure III.81 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques	66
Figure III. 82 Tension appliquée aux bornes des batteries devéhicule en fonction de temps.....	66
Figure III.83 Courant fourni /absorbé par la batterie en fonction de temps	67
Figure III.84 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique	67

Liste des tableaux

Tableau I.1 Comparaison des technologies de batteries.....	8
Tableau I.2 Etude comparative de fiabilité des moteurs des véhicules électriques	9
Tableau I.3 Comparaison de trois types de cellules PV... ..	16
Tableau I.4 Ensoleillement moyen en Algérie selon les régions climatiques.....	17
Tableau II.1 Paramètres de véhicule utilisé.....	21

Liste des symboles

$F_{aéro}$	Force aérodynamique
F_{roul}	Force de roulement
F_{prof}	Force de pente (force du profil de route)
F_g	Force due au passage dans un tunnel
F_{res}	Force résistante totale
F_t	Force de traction
V_{veh}	Vitesse du véhicule (m/s)
V_{ven}	Vitesse du vent (m/s)
ρ	Masse volumique de l'air (kg/m ³)
θ	Angle de la pente (rad)
K_t	Coefficient tunnel
A_f	Aire frontale du véhicule
δ	Coefficient d'inertierotationnelle
α	Accélération du véhicule (m/s ²)
k	Rapport de réduction de la transmission
R_r	Rayon de la roue (m)
C_{roues}	Couple aux roues (N .m)
ω	Vitesse angulaire (rad/s)

$P_{\text{nécessaire}}$	Puissance nécessaire aux roues (W)
η	Rendement de transmission
R_{sh}	Résistance shunt (Ω)
R_s	Résistance série (Ω)
I	Courant de sortie de la cellule (A)
V	Tension de sortie de la cellule (V)
I_s, I_{s2}	Courants de saturation des diodes (A)
n_1, n_2	Facteurs d'idéalité des diodes
T	Température absolue en (K)
Q	Charge élémentaire constante (C)
K	Constante de Boltzmann (J/k)
I_{ph}	Photo-courant (A)
S	Pourcentage d'insolation
$I_{ph\text{max}}$	Photo-courant maximal (A)
E_g	Largeur de bande interdite (eV)
V	La tension de sortie de la batterie
U	La tension aux bornes de la capaci
R, C	Composants RC du modèle (Ω , F)
U_{ocv}	La tension du circuit ouvert
SOC	État de charge (state of charge)

SOC₀	État de charge initial
Q₀	Capacité actuelle de la batterie (Ah)
a, b	Coefficients linéaires
x	Vecteur d'état
A, B	Matrices dynamiques
C, D	Matrices d'observation

Abréviations et définitions

VER	Véhicules électriques rechargeable (Plug-in Electric Vehicles)
BEV	Battery Electric Vehicles (Véhicules tout Électriques)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Véhicles (Véhicules Hebrides rechargeable)
EREV	Extended Range Electric Véhicles (VehiculesÉlectriques a Autonomie Prolongée)
VEPC	Véhicules électriques a Pile a combustible (Fuel cell Electric Vehicles)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Suivi du Point de puissance Maximale)
P&O	Perturbation et Observation (Algorithme de contrôle MPPT)
MCC	Machine a courant continu (DC Motor)
MAP	Machine a Aimants Permanents (Permanent MagentMotor)
MRV	Machine a Reluctance Motor (Switched Reluctance Motor)
Ni-MH	Nickel-Metal Hydrure (Nickel-Metal Hydride Battery)
Ni-Cd	Nickel-Cadmium (Nickel-Cadmium Battery)

PV	Photovoltaïque (Photovoltaic – lie aux cellules solaires)
H2	Dihydrogene
O2	Dioxygene
H2O	Eau

Résumé :

Aujourd'hui, le véhicule électrique équipé de panneaux photovoltaïques (VER/ PV) s'impose comme l'une des meilleures solutions en matière de respect de l'environnement de confort et d'indépendance vis-à-vis des carburants fossiles. Cependant pour ce type de véhicule devienne réellement utilisable et populaire, il est essentiel de mettre en place un réseau d'infrastructures de recharge suffisamment dense et accessible.

Ce travail présente une nouvelle approche visant à intégrer des panneaux solaires pour recharger les véhicules électriques, considérés aujourd'hui comme le moyen de transport le plus écologique. Ces véhicules suscitent un vif intérêt tant chez les constructeurs automobiles que chez les pouvoirs publics, dans le but de répondre aux diverses problématiques posées par les véhicules à moteur thermique

Les mots clés :

Générateur photovoltaïque, MPPT, P&O, Véhicule électrique rechargeable (VER), Batterie, Dynamique du véhicule, Simulation MATLAB/Simulink, Intégration solaire, Commande électrique, Rendement énergétique.

Abstract :

Today, the electric vehicle equipped with photovoltaic panels (EV/PV) stands out as one of the best solutions in terms of environmental protection, comfort, and independence from fossil fuels. However, for this type of vehicle to become truly usable and popular, it is essential to establish a sufficiently dense and accessible charging infrastructure network. This work presents a new approach aimed at integrating solar panels to recharge electric vehicles, which are now considered the most environmentally friendly mode of transportation. These vehicles are generating strong interest from both automakers and public authorities, as a response to the various issues raised by internal combustion engine vehicles.

Keywords :

Photovoltaic Generator, MPPT, P&O, Rechargeable Electric Vehicle (REV), Battery, Vehicle Dynamics, MATLAB/Simulink Simulation, Solar Integration, Electrical Control, Energy Efficiency.

ملخص:

يُعدّ اليوم المركب الكهربائي المجهز بألواح شمسية (VER/PV) من أفضل الحلول من حيث حماية البيئة، وتوفير الراحة، والاستقلالية عن الوقود الأحفوري. ومع ذلك، ولكي يصبح هذا النوع من المركبات قابلاً للاستخدام على نطاق واسع وشائعاً، من الضروري إنشاء شبكة من البنى التحتية لمحطات الشحن تكون كثيفة وسهلة الوصول. يعرض هذا العمل مقارنة جديدة تهدف إلى دمج الألواح الشمسية لشحن المركبات الكهربائية، التي تُعتبر اليوم وسيلة النقل الأكثر حفاظاً على البيئة. وقد أثارت هذه المركبات اهتماماً كبيراً لدى كل من مصنعي السيارات والسلطات العمومية، في محاولة لمعالجة مختلف الإشكاليات التي تطرحها المركبات ذات المحرك الحراري

الكلمات المفتاحية:

مولد ضوئي شمسي، التتبع الأقصى لنقطة القدرة (MPPT)، خوارزمية الاضطراب والمراقبة (P&O)، مركبة كهربائية قابلة لإعادة الشحن، البطارية، ديناميكية المركبة، المحاكاة بـ MATLAB/Simulink، دمج الطاقة الشمسية، التحكم الكهربائي، كفاءة الطاقة.

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par une crise énergétique croissante et une prise de conscience écologique accrue, la réduction de la dépendance aux énergies fossiles et la limitation des émissions de gaz à effet de serre sont devenues des priorités. Le secteur du transport, fortement contributeur à la pollution atmosphérique, est au cœur de cette transition. Ainsi, les véhicules électriques rechargeables (VER) s'imposent progressivement comme une alternative durable aux véhicules à moteur thermique [1].

Malgré leurs nombreux avantages, notamment l'absence d'émissions directes et une meilleure efficacité énergétique, les véhicules électriques présentent encore certaines limites, notamment en termes d'autonomie, de durée de recharge et de dépendance au réseau électrique. Pour surmonter ces contraintes, l'intégration des sources d'énergie renouvelable, en particulier les panneaux photovoltaïques (PV), constitue une piste de recherche prometteuse. Cette intégration permettrait non seulement de prolonger l'autonomie des véhicules, mais aussi de réduire la consommation énergétique issue du réseau et d'exploiter l'énergie solaire de manière mobile et décentralisée.

Ce mémoire a pour objectif d'étudier l'impact de l'intégration des panneaux photovoltaïques sur les performances énergétiques des véhicules électriques rechargeables. Il s'agit notamment de modéliser et simuler un système combinant un véhicule électrique, une batterie de stockage, et un générateur photovoltaïque. L'analyse porte sur l'évaluation des gains d'énergie, les améliorations possibles de l'autonomie, et les performances globales du système dans différentes conditions d'ensoleillement et de profil de route [1].

Ce modeste travail s'articule autour de trois chapitres, en plus d'une introduction générale et d'une conclusion.

Dans le premier chapitre, nous présentons une description générale du véhicule électrique et de ses différents composants. Il présente les éléments qui constituent la chaîne de traction électrique, en expliquant leur rôle et leur fonctionnement au sein du système global.

Le deuxième chapitre est consacré au dimensionnement et à la modélisation des principaux éléments d'un véhicule électrique rechargeable. Il s'intéresse notamment à la modélisation de la dynamique du véhicule, du générateur photovoltaïque, ainsi que du système de stockage représenté par la batterie. Ces modèles permettent de reproduire le comportement global du véhicule dans différentes conditions de fonctionnement. Ils offrent également la possibilité d'évaluer avec précision ses besoins énergétiques, d'analyser l'impact de chaque composant sur les performances globales, et d'explorer des solutions d'optimisation visant à améliorer l'autonomie, le rendement énergétique et la stabilité du système.

Le dernier chapitre, sera consacré à la simulation numérique du système complet sous l'environnement MATLAB/Simulink. Cette étape va nous permettre d'analyser les

performances du véhicule électrique avec et sans l'intégration de l'énergie photovoltaïque, en mettant en évidence l'impact de l'ensoleillement et de l'inclinaison de la route sur l'autonomie et le rendement énergétique du système global.

À travers cette étude, nous visons à mieux comprendre le potentiel de l'intégration photovoltaïque dans les véhicules électriques, et à proposer une approche de modélisation et de simulation permettant d'optimiser cette intégration pour une mobilité plus durable et autonome.



I.1 Introduction

Face aux défis environnementaux croissants et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, le secteur des transports connaît une transformation majeure. Les véhicules électriques rechargeables (VER) émergent comme une solution prometteuse pour une mobilité plus durable. Ces véhicules qui incluent les voitures entièrement électriques (BEV) et les hybrides rechargeables (PHEV) utilisant l'électricité stockée dans des batteries pour propulser le moteur, réduisant ainsi la dépendance aux carburants fossiles et les émissions polluantes [2].

L'adaptation des véhicules électriques rechargeables (VER) est en constante progression soutenue par des avancées technologiques, des incitations gouvernementales et une prise de conscience accrue des enjeux environnementaux. Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie des véhicules électriques rechargeables, en explorant leurs fonctionnements, leurs types, leurs avantages et les défis associés à leur intégration dans le paysage automobile actuel.

I.2 Véhicules électriques rechargeables

Les véhicules électriques rechargeables utilisent un ou plusieurs moteurs électriques alimentés par une batterie rechargeable via une source de l'électricité externe. Ils se divisent en deux catégories : les véhicules entièrement électriques (BEV), sans moteur thermique et les hybrides rechargeables (PHEV), combinant un moteur électrique et un moteur thermique. Leur système de propulsion comprend un dispositif de stockage d'énergie à l'égard des batteries, des super condensateurs, des piles à combustible, etc.

Les VER réduisent les émissions nécessitent et offrent une certaine flexibilité, mais présentent aussi des limites comme l'autonomie, le temps de recharge et le coût initial. Ils constituent une étape clé vers une mobilité plus durable.

L'architecture est très simple. Elle est constituée d'un actionneur électrique, d'un dispositif de transmission, et des roues (voir figure I.1)

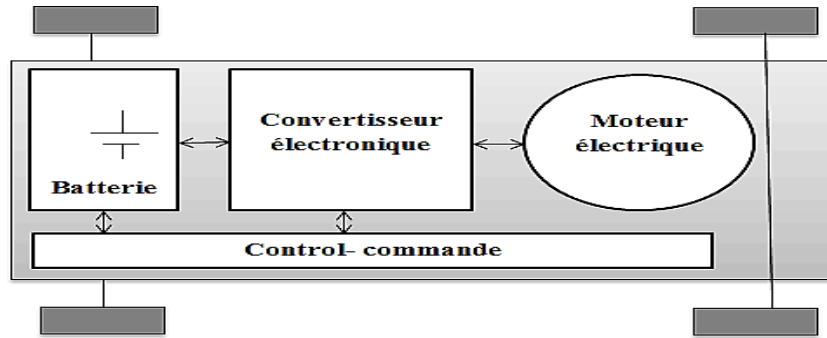


Figure I.1 Système d'entraînement d'un VER

I.3 Historique VER

Le véhicule électrique n'est pas une invention récente ; il existe depuis environ un siècle et demi et n'a cessé d'évoluer. Les premiers modèles motorisés sont apparus à la fin du 19^{ème} siècle, initialement conçus comme alternative à la traction humaine. En 1881, Charles Jeantaud inaugure le premier des véhicules électriques avec sa Tilbury, bien que celle-ci prenne feu seulement 100 mètres. En 1899, le Belge Camille Jenatton marque l'histoire avec « La Jamais Contente », une voiture course électrique atteignant les 100km/h, c'était un record à l'époque. Toutefois, les limitations majeures comme la faible autonomie et la complexité de la conduite ont empêché ces véhicules de s'imposer, surtout face à la montée en puissance des voitures à moteurs thermique, plus fiables et pratiques. Rapidement adoptée par le marché, la propulsion thermique devient la norme [4].

Mais cette domination s'est peu à peu fissurée. En période de crise-comme durant les guerres mondiales ou les chocs pétroliers de 1973 et 1990 la dépendance au pétrole a montré les limites de cette technologie. A cela s'ajoutent les préoccupations croissantes liées à la pollution. Ces facteurs ont maintenu l'électrique dans les débuts, bien qu'il ne soit réellement remis au centre des discussions qu'en période critique. Cette tendance s'est inversée dans les années 1970, lorsque les impacts environnementaux sont devenus plus évidents. Dès lors les recherches autour des véhicules électriques ont été relancées, aboutissant à la conception de prototypes plus performants, sans toutefois égaler les capacités des moteurs thermiques [5].

Dans les années 1990 une solution intermédiaire voit le jour : le véhicule hybride, qui combine moteur thermique et moteur électrique. Cette innovation ouvre de nouvelles voies avec des modèles comme la Toyota Prius lancée en 1998, qui connaît un grand succès. Le 21^{ème} siècle annonce donc un développement favorable aux véhicules hybrides et encore davantage aux véhicules entièrement électriques, dont les performances et les technologies s'améliorent continuellement [6].

I.4 Types de véhicule électrique rechargeable

Les véhicules électriques rechargeables (VER) se divisent en plusieurs catégories selon leurs mode capacité à fonctionner à l'électricité voici les principaux types :

I.4.1 Véhicules tout électriques (Battery Electric vehicles –BEV)

Les véhicules tout électriques BTE sont propulsés exclusivement par un ou plusieurs moteurs électriques alimentés par une batterie rechargeable. Ils ne disposent d'aucun moteur thermique, ce qui signifie qu'ils n'émettent pas de gaz d'échappement, contribuant ainsi à la réduction de la pollution atmosphérique et sonore notamment en milieu urbain. Ces véhicules sont particulièrement adaptés aux trajets urbains et quotidiens, où les limitations de puissance et d'autonomie sont moins contraignantes par exemple une citadine équipée d'une batterie de 24kwh peut offrir une autonomie d'environ 130km, tandis qu'une berline avec une batterie 50kwh peut atteindre jusqu'à 200km selon les conditions d'utilisation. Cependant le développement est étroitement lié à l'évolution des technologies de stockage d'énergie. Les batteries actuelles bien que de plus en plus performantes présentent encore des défis en termes des densités énergétiques. Exemple : une batterie de 60 à 100 kWh peut peser entre 350 et 600 kg [7-8]. On distingue essentiellement deux types des véhicules électriques : voitures électriques à batteries rechargeables par prise de courant et voitures électriques à alimentation par pile à combustible.

I.4.2 Les véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant

Les véhicules électriques équipés de batteries représentent aujourd'hui la majorité du parc mondial de véhicules électriques. Une batterie est un dispositif embarqué capable de stocker de l'énergie électrique pour la restituer ultérieurement. A ce jour elle demeure la solution la plus adaptée à l'alimentation des véhicules électriques. Inventée au 19^{ème} siècle elle constitue le système de stockage d'énergie le plus maîtrisé sur le plan technique [7].

I.4.3 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible

Les véhicules électriques à pile à combustible(VEPC) ressemblent aux autres véhicules électriques, à la différence après qu'ils génèrent leur propre électricité à bord. Cette électricité est produite par une pile à combustible, un dispositif électrochimique comparable à une batterie sous certains aspects. Contrairement à une batterie qui emmagasine puis libère l'énergie, la pile à combustible crée de l'électricité en continu grâce à une réaction chimique, tant qu'elle est approvisionnée en carburant.

Il existe plusieurs types de piles à combustible utilisant divers carburants, mais la plus prometteuse pour les véhicules est la pile à membrane échangeuse de protons, qui fonctionne avec de l'hydrogène(H_2) et l'oxygène de l'air.

Chapitre I : Généralités et description des véhicules électriques rechargeables

Bien que la pile à combustible soit une invention ancienne datant du début du 19^{ème} siècle en Angleterre, par Sir Henry Davy et Sir William Grove, son utilisation dans le secteur automobile est relativement récente et encore en phase expérimentale. Son fonctionnement repose sur une réaction entre l'hydrogène et l'oxygène, générant de l'électricité de l'eau et de la chaleur [8].

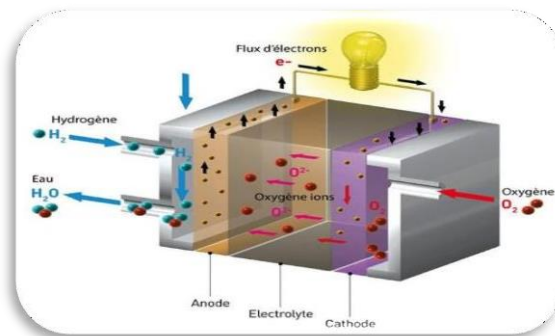
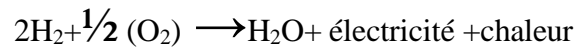


Figure I.2 Principe de fonctionnement de la pile à combustible

I.4.4 Véhicules hybrides rechargeables

Les véhicules hybrides rechargeables ou PHEV (plug-in Hybrides Electric Vehicles) associent deux sources d'énergie : une énergie thermique (généralement à essence) et une énergie électrique alimentée par une batterie rechargeable. Cette double motorisation permet une utilisation flexible, en combinant les avantages de la mobilité électrique pour les courts trajets et ceux du moteur thermique pour les longues distances [9].

I.4.5 Véhicules électriques à autonomie prolongée (EREV-Extended Range Electric vehicle)

Le véhicule électrique à autonomie prolongée est un véhicule propulsé uniquement par un moteur électrique, mais équipé d'un petit moteur thermique qui sert à recharger la batterie lorsque celle-ci est vide. Il permet de rouler en mode 100% électrique sur environ 60 à 100 km, puis jusqu'à 500 km grâce au générateur thermique. Il combine les avantages de l'électrique (zéro émission locale, conduite silencieuse) avec la flexibilité d'un prolongateur d'autonomie, toutefois son coût élevé, sa complexité technique et sa faible disponibilité sur le marché limitent sa diffusion [9].

I.5 Composants principaux d'un VER

La structure du véhicule électrique rechargeable ainsi que ses composants de base sont illustrés à la figure I.3.

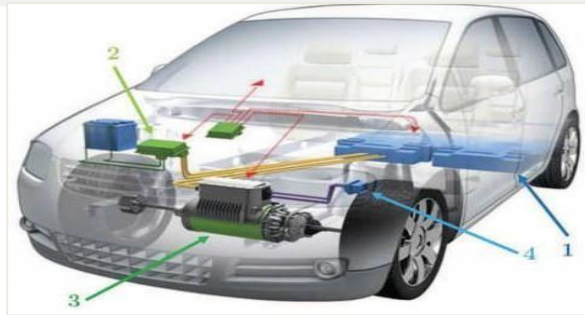


Figure I.3 Composants principaux du VE

I.5.1 Batterie

Il s'agit de l'élément central de la technologie des véhicules électriques rechargeables. La batterie, véritable réservoir d'énergie électrique est constituée de plusieurs cellules, chacune comprenant une cathode, un séparateur assurant l'isolation électrique des électrodes, un électrolyte, ainsi qu'un boîtier de confinement. Une batterie de traction doit répondre aux exigences suivant [10] :

- Une puissance massique élevée, permettant d'assurer au véhicule de bonne accélération et reprise ;
- Un grand nombre de cycles de charge et décharge sans altération significative des performances ;
- Faible coût de production ;
- Sécurité d'utilisation optimale, sans risque d'explosion ni émission de gaz nocifs ;
- Capacité à estimer avec précision l'état de charge de la batterie ;
- Possibilité de recharge rapide.



Figure I.4 Emplacement de la batterie du VE

Choix des batteries du système de recharge :

Il existe deux grandes catégories de batterie : les batteries stationnaires et les batteries de traction. Dans le cadre de cette étude l'objectif est de déterminer la

Chapitre I : Généralités et description des véhicules électriques rechargeables

technologie de batterie la plus adaptée pour répondre aux exigences du véhicule électrique étudié. Pour ce faire nous nous limiterons à la comparaison de quatre technologies de batterie : (batterie au plomb, batterie Ni-MH, batterie Li-ion, et batterie Ni-Cd). Les caractéristiques de ces quatre technologies sont exposées dans le tableau

Tableau I.1 Comparaison des technologies de batteries

	Energie massique [Wh/kg]	Densité d'énergie [Wh/litre]	Coût indicatif [Euros/kWh]
Batterie au plomb	30-50	75-120	200-250
Batterie Ni-MH	60-110	220-330	1500-2000
Batterie Li-Ion	150-190	220-330	2000
Batterie Ni-Cd	45-80	80-150	600

I.5.2 Moteur de propulsion

Pour assurer la traction des véhicules électriques plusieurs types de moteurs peuvent être utilisés. Il peut s'agir de moteurs à balais, comme les moteurs à courant continu, ou de moteurs sans balais, tels que les moteurs synchrones ou asynchrones. La (figure I.5) présente une classification des motorisations employées dans les véhicules électriques ou hybrides rechargeables. Dans cette classification on trouve les : Machine à Courant Continu (MCC), Machine à Aimants Permanents (MAP), Machine à Réductance Variable (MRV), etc.

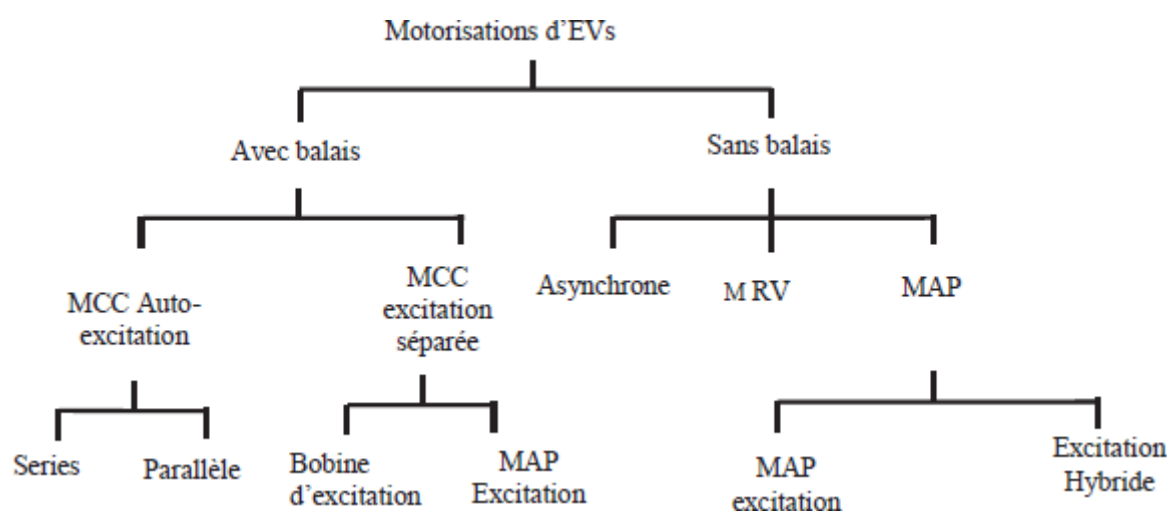


Figure I.5 Classification des motorisations des VE

Les principales caractéristiques requises pour une machine électrique utilisée en traction sont les suivantes [11] :

1. Une densité élevée de couple de puissance ;

Chapitre I : Généralités et description des véhicules électriques rechargeables

2. Un couple important aussi bien au démarrage qu'à basse vitesse, ainsi qu'au farinage, même à haute puissance et à grande vitesse ;
3. Une large plage de variation de la vitesse, incluant une zone de puissance constante pouvant atteindre 3 à 4 fois la vitesse nominale ;
4. Un rendement élevé sur une large plage de vitesses et de couples, y compris lors du fonctionnement à faible couple ;
5. Une capacité de surcharge, généralement équivalente à deux fois le couple nominal, pendant une courte durée ;
6. Une fiabilité et une robustesse adaptées aux conditions d'utilisation dans un véhicule ;
7. Un coût raisonnable.

Tableau I.2 Étude comparative de fiabilité des moteurs des véhicules électriques

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

I.5.3 Système de gestion de l'énergie

Un système de gestion de l'énergie(EMS) optimise l'utilisation de la batterie et du moteur en fonction des conditions de conduite. Il gère les flux d'énergie entre la batterie, le moteur, le freinage régénératif et dans certains cas, le moteur thermique. Son rôle principal est d'assurer l'efficacité, la sécurité et la durabilité du système électrique du véhicule [11].

Grâce à la solution EMS, développée en partenariat avec des leaders tels que ScoptVision et MINT Advanced, vous pouvez intégrer et gérer votre infrastructure énergétique de façon transparente. Conçu pour rendre les systèmes de recharge plus intelligents, l'EMS garantit une utilisation optimale de l'énergie que ce soit pour la recharge de véhicule électrique ou l'exploitation de l'énergie solaire.

I.5.4 Système de recharge

Les véhicules électriques rechargeables (VER) nécessitent un système de recharge performant pour alimenter leur batterie à partir d'une source externe. Ce système comprend plusieurs éléments clés, dont le chargeur embarqué, les connecteurs et l'interface de gestion énergétique [11]. L'objectif principal est d'assurer une recharge sûre, rapide et optimisée, tout en préservant la durée de vie de la batterie.

- A. **Chargeur embarqué (On-Board charger-OBC):** Le chargeur embarqué est intégré au véhicule. Il convertit le courant alternatif (AC) provenant du réseau électrique, en

Chapitre I : Généralités et description des véhicules électriques rechargeables

courant continu(DC) nécessaire à la batterie. Sa puissance détermine la vitesse de recharge en mode AC.

B. **Types de recharge:** il existe principalement deux types de recharge :

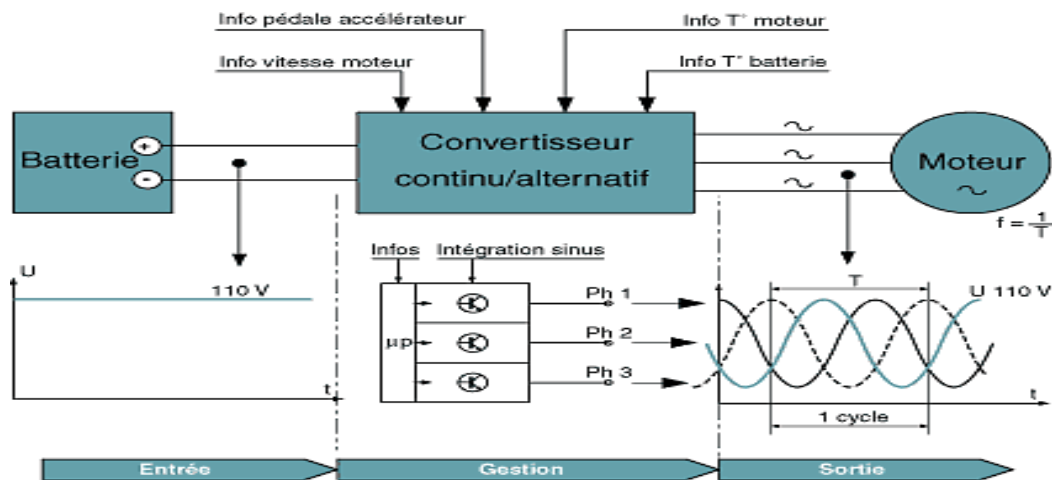
- **Recharge lente ou normale (AC, niveaux 1 et 2) :** Réalisée via une prise domestique ou une borne murale. Elle prend plusieurs heures.
- **Recharge rapide (DC, niveau 3) :** se fait via des bornes spéciales à haute puissance. Elle permet de recharger 80% de la batterie en moins d'une heure.

I.6 Les convertisseurs de puissance

L'actionneur peut être alimenté soit par un onduleur de courant, soit par un onduleur de tension. Toutefois dans cette gamme de puissance et pour une alimentation par batterie, un onduleur de tension triphasé constitue une solution adaptée.

L'onduleur permet d'alimenter la machine avec un courant à fréquence variable, selon le couple et la vitesse. La commande électronique génère les signaux nécessaires à l'onduleur en se basant sur la position du rotor et la mesure des courants dans la machine. Dans notre application le moteur peut être alimenté par un onduleur de tension piloté en courant à l'aide d'une modulation de largeur d'impulsion (MLI) [10, 12].

Le contrôle des courants s'effectue au moyen de régulateurs qui assurent le suivi d'une fréquence et amplitude variable.



Les convertisseurs de puissance utilisables à bord d'un véhicule électrique sont les suivant :

- **Hacheur :** Convertisseur permettant de transformer une tension continue à une autre tension continue de valeur différente (DC/DC) ;
- **Onduleur :** Convertisseur transformant une tension continue en tension alternative (DC/AC) ;

Chapitre I : Généralités et description des véhicules électriques rechargeables

- **Redresseur** : Convertisseur permettant de transformer une tension alternative en une tension continue (AC/DC).

I.6.1 Hacheur survolteur (ou BOOST)

Ce hacheur comporte trois composants essentiels :

Une inductance L , une capacité C et un interrupteur qui peut prendre deux états $U=1$ et $U=0$.

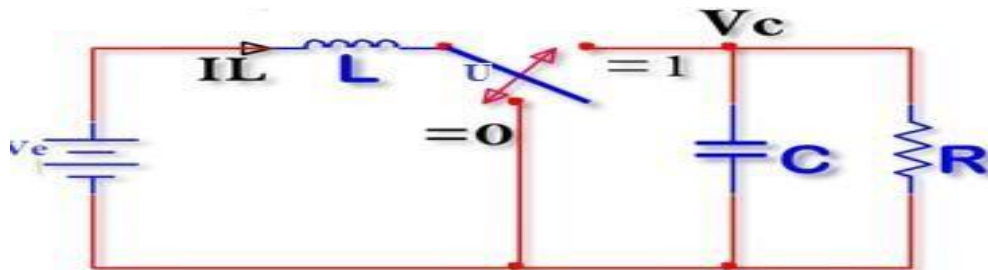


Figure I.7 Principe d'un hacheur parallèle (BOOST).

I.6.2 Technique de commande de L'MPPT

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking), est une stratégie de contrôle indispensable, permettant au module photovoltaïque de fonctionner en permanence à son point de puissance maximale (figure I.8) [13].

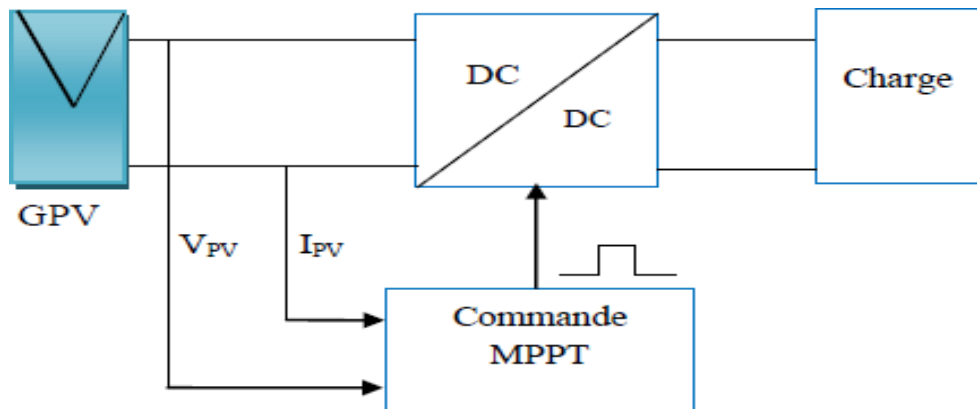


Figure I. 8 Principe de la Commande

I.6.2.1 Principe de fonctionnement de MPPT d'un générateur PV

La commande MPPT permet d'extraire la puissance maximale d'un module photovoltaïque en adaptant automatiquement le rapport cyclique α du signal qui commande le convertisseur d'énergie. Cette adaptation est nécessaire pour compenser les variations des conditions météorologiques ou de la charge. Par exemple pour une irradiation donnée une valeur optimale α permet d'atteindre le point de puissance maximale (PPM). Si l'irradiation ou la charge change, ce point optimal se déplace, et il

Chapitre I : Généralités et description des véhicules électriques rechargeables

faut alors ajuster α pour retrouver le nouveau PPM et ainsi maximiser la puissance transférée à la charge.

I.6.2.2 Algorithme « perturbation et observation » (P&O)

Cet algorithme est le plus couramment utilisé pour suivi du point de puissance maximale (PPM), repose sur le principe de perturbation et observation. Il consiste à modifier légèrement la tension de référence (V_{ref}) ou directement le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis à observer l'effet de cette perturbation sur la puissance de sortie du panneau.

Si la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la puissance précédente $P(k-1)$, la perturbation continue dans le même sens sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

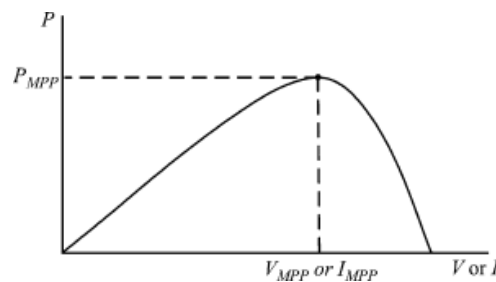


Figure I.9 Courbe caractéristique de puissance du générateur photovoltaïque

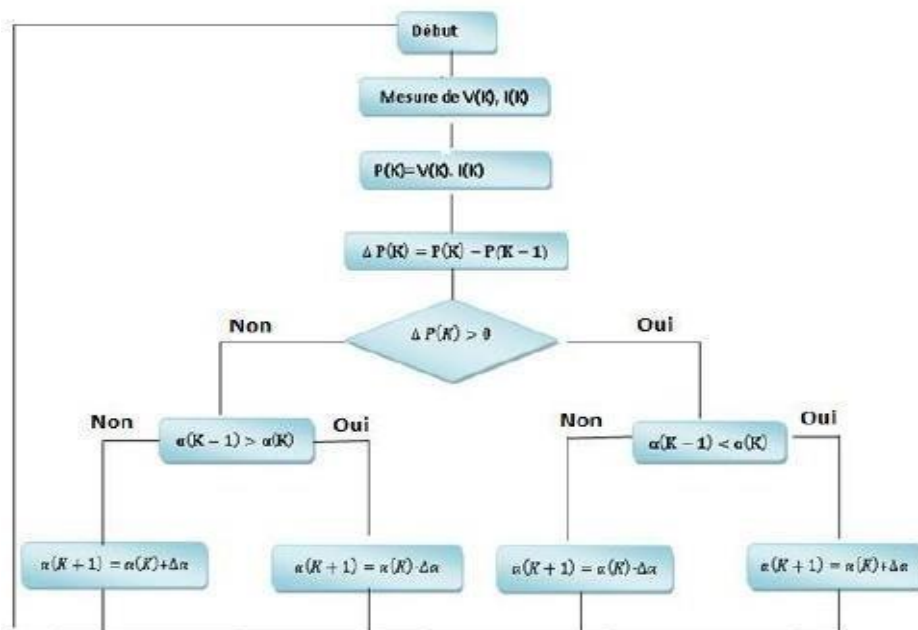


Figure I.10 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)

I.7 Fonctionnement générale d'un VER

Les véhicules électriques disposent d'une batterie qui emmagasine l'énergie électrique, laquelle est rechargée à partir du réseau. Ils intègrent également un ou

plusieurs moteurs électriques, un système de contrôle ainsi qu'un chargeur destiné à la batterie.

La batterie est reliée au moteur électrique via un régulateur et un convertisseur. Le rôle du régulateur est de moduler l'intensité du courant envoyé au moteur. Son principe de fonctionnement est le suivant : lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'accélérateur, la batterie fournit du courant. Ce courant continu(DC) est ensuite converti en courant alternatif (AC) par le convertisseur afin d'alimenter le moteur électrique.

Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. L'un des principaux atouts du véhicule électrique réside dans sa chaîne de transmission électronique. En effet pour assurer une bonne accélération, un véhicule nécessite un couple élevé à basse vitesse, tandis qu'à vitesse de croisière, un couple plus faible est suffisant. Ces caractéristiques correspondent parfaitement au fonctionnement d'un moteur électrique [6].

I.8 Véhicule électrique à panneau solaire

La voiture solaire est un véhicule électrique qui n'a plus besoin d'être branché pour se recharger, grâce à l'énergie solaire. Cependant ce type de véhicule présentait initialement plusieurs limitations, notamment un faible rendement énergétique, une vitesse de déplacement réduite et un couple moteur insuffisant. Ces contraintes ont conduit à envisager d'autres approches technologiques.

Aujourd'hui les avancées dans le domaine des panneaux photovoltaïques et leur intégration directe à la carrosserie du véhicule permettent d'envisager, à court terme une solution efficace et durable face aux problèmes environnementaux causés par le transport routier. La voiture à panneaux solaires représente un choix incontournable pour notre pays l'Algérie pour plusieurs raisons :

- Situation géographique du pays : étant donné que la durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire du pays peut atteindre les 3900 heures /ans ;
- La très grande surface du pays tenant en considération les points éloignés et ces approvisionnements en matière d'énergie ;
- Situation économique du pays et les charges très élevées envisage.

Compte tenu de la politique actuelle liée au secteur automobile à moteur thermique marquée par des coûts élevés et des enjeux environnementaux, l'adaption de la voiture solaire apparaît comme une alternative prometteuse.

Comment ça fonctionne ? Depuis quelques années plusieurs constructeurs et start-up travaillent au développement de voitures électriques capables de se recharger grâce à l'énergie solaire. Ces véhicules sont équipés de cellules photovoltaïques intégrées à leur carrosserie, l'efficacité de cette technologie dépend principalement du niveau d'ensoleillement du lieu de stationnement du véhicule, ainsi que de la propreté des

surfaces photovoltaïques.

I.8.1 Véhicule /PV état d’art

Ces limitations ont conduit les chercheurs et les ingénieurs à envisager de nouvelles approches technologiques. Les avancées récentes dans le domaine des panneaux photovoltaïque, ainsi que leur intégration directe à la carrosserie des véhicules, ouvrent la voie à une solution durable et efficace face aux problématiques environnementales causées par le secteur du transport routier. La voiture équipée de panneaux solaires représente ainsi une alternative incontournable, moins coûteuse et très avantageuse, particulièrement pour des pays comme l’Algérie, en raison de plusieurs facteurs climatiques, économiques et énergétiques favorables :

- ✓ Sur le plan économique, les charges élevées liées à l’importation des véhicules thermiques représentant un fardeau pour le pays rendant nécessaire une transition vers des alternatives plus durables. Ces dernières années, plusieurs constructeurs et start-up ont développé des voitures électriques capables de se recharger grâce à des cellules photovoltaïques intégrées à la carrosserie. Le fonctionnement de cette technologie repose principalement sur l’ensoleillement, le lieu de stationnement du véhicule et l’état de propreté des panneaux solaire.



Figure I.11 Véhicule électrique à panneau solaire HYUNDAI-ioniq5

Hyundai-ioniq5 est un SUV (Sport Utility Vehicle) 100% électrique moderne, peut transporter jusqu’à 5 passagers avec un haut niveau de confort. Selon la version, elle peut atteindre une autonomie allant jusqu’à 507 km et une vitesse maximale de 185 km/h, sa batterie allant jusqu’à 84kWh, se recharge très rapidement, de 10 à 80% en 18 minutes sur une borne ultra-rapide [5-14].

I.8.2 Etat de l’art sur le photovoltaïques

I.8.2.1 Définition

L’énergie solaire photovoltaïque présente l’avantage de pouvoir être installée presque n’importe où (sur les toits édifices, en verrière, et même sur les façades des immeubles en remplacement des matériaux de revêtement.). C’est pourquoi de

Chapitre I : Généralités et description des véhicules électriques rechargeables

nombreux pays lancent de larges programmes d'équipement solaire, visant notamment à réduire les coûts de production des panneaux. Parmi ses applications les plus prometteuses figure la recharge des véhicules, une solution particulièrement efficace pour éliminer les émissions de CO₂ [15].

Un panneau photovoltaïque est composé d'un ensemble de cellules photovoltaïques, elles-mêmes constituées de matériaux semi-conducteurs organisés en deux couches : une couche dopée positivement (P) et une couche dopée négativement (N), formant ainsi une jonction PN (figure I.12). Le principe de fonctionnement repose sur l'absorption de la lumière qui arrache des électrons des atomes du semi-conducteur. Ce phénomène génère un trou à l'endroit où l'électron a été libéré agissant comme une charge positive.

Les électrons migrent alors vers la couche N, tandis que les trous se dirigent vers la couche P, ce qui engendre une séparation des charges et crée une différence de potentiel électrique utilisable comme source d'énergie. Ainsi qu'une cellule photovoltaïque produit du courant électrique continu.

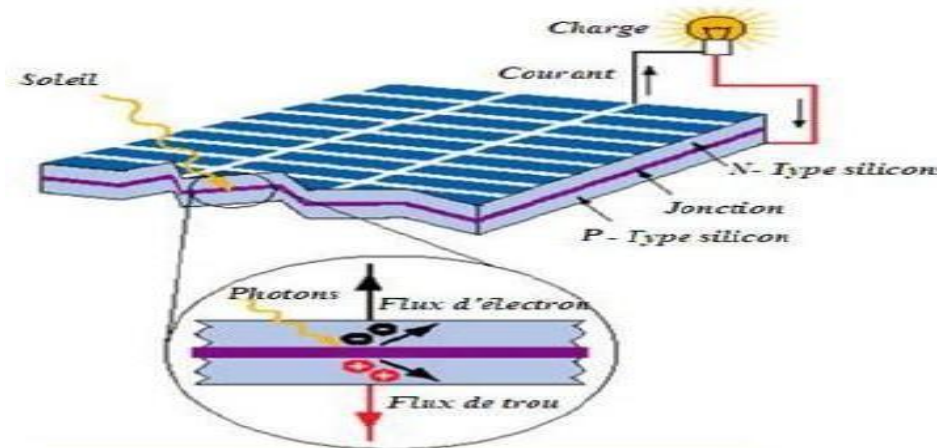


Figure I.12 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.8.2.2 Différents types de cellules PV

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, classés selon les matériaux utilisés pour leur fabrication. À titre d'exemple, on peut citer les cellules en silicium monocristallin, en silicium polycristallin et en silicium amorphe. Ces différentes catégories sont illustrées par le (tableau I.3).

Tableau I.3 Comparaison de trois types de cellules PV

	Avantages	Inconvénient
Silicium amorphe	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionne avec un éclairage faible - Un peu moins que les techniques - Intégration sur supports ou rigides 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible en plein soleil 5% à 7% - Surfaces importantes - Performance diminue avec le temps dès l'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois)
Silicium monocristallin	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement de 14% à 16% - Nombre de fabricants élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Baisse du rendement avec l'augmentation de la température
Silicium poly cristallin	<ul style="list-style-type: none"> - Cellule carrée permettant un meilleur fonctionnement dans un module - Rendement de 9% à 11% - Lingot moins cher à produire que le monocristallin 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible sous un faible éclairage

I.8.2.3 Le gisement solaire en Algérie

Le Soleil demeure, à ce jour, la principale source d'énergie, malgré la grande distance qui le sépare de la Terre (environ 150 millions de kilomètres). Il émet une puissance rayonnante estimée à 90×10^{15} GW, mais seule une fraction de cette énergie, environ 180×10^6 GW, atteint l'atmosphère terrestre. Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est en partie modifié par des phénomènes d'absorption et de diffusion atmosphériques. Malgré ces pertes, l'énergie solaire reste abondante à la surface de la Terre. En effet, l'irradiation solaire peut atteindre jusqu'à 1000 W/m^2 dans les zones tempérées, et monter à 1400 W/m^2 dans des conditions atmosphériques peu polluées [16].

Grâce à sa position géographique avantageuse, l'Algérie bénéficie d'un des plus importants potentiels solaires au monde, se classant première dans le bassin méditerranéen. Selon une évaluation par satellite menée par l'Agence Spatiale Allemande (ASA), le pays disposerait d'un potentiel annuel de 169 000 TWh pour le solaire thermique et de 13,9 TWh pour le photovoltaïque. Ce potentiel équivaut à la découverte de dix gisements majeurs de gaz naturel à Hassi R'Mel [17].

La durée d'ensoleillement en Algérie dépasse les 2000 heures par an sur la quasi-totalité du territoire, et peut atteindre jusqu'à 3900 heures dans les régions des hauts plateaux et du Sahara. La répartition du potentiel solaire par zone climatique est présentée dans le tableau I.2, en fonction de l'ensoleillement annuel reçu [18].

Chapitre I : Généralités et description des véhicules électriques rechargeables

Tableau I.4 Ensoleillement moyen en Algérie selon les régions climatiques

Régions	Régions côtières	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

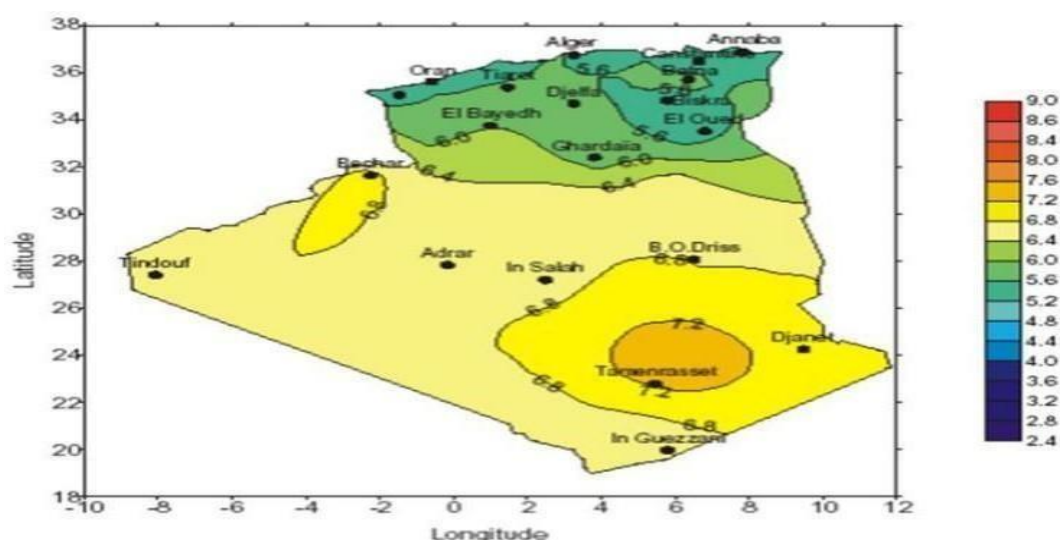


Figure I.13 Carte d'éclairement solaire de l'Algérie [17]

I.9 Avantages et inconvénient des véhicules électriques

I.9.1 Avantages

La voiture électrique possède plusieurs avantages qui la prédominent sur les véhicules à combustion interne et qu'on peut les énumérer comme suit :

- Les véhicules électriques sont dépourvus de pollution sonore puisqu'ils sont totalement silencieux ;
- Les véhicules électriques sont agréables à conduire, avec un roulement qualifié de « doux » en raison d'une accélération continue et progressive car le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage) ;
- L'architecture technique des véhicules électriques est simple il est composés de 6000 pièces de moins qu'une auto traditionnelle ;
- Ces véhicules sont plus faciles d'entretien et leurs dépenses sont réduites de 30 à 40% (par exemple le moteur électrique ne requiert pas de vidange). De plus, les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses ;
- Les véhicules électriques ne consomment pas d'énergie dans les embouteillages et les freinages (la voiture se recharge seule). Ils sont donc très adaptés au milieu urbain qui sera le principale mode d'habitat du futur (mégapole) ;

Chapitre I : Généralités et description des véhicules électriques rechargeables

- Le moteur électrique a un rendement énergétique 3 fois plus élevé que celui d'un moteur thermique ;
- Le démarrage est très rapide, il suffit d'appuyer sur un bouton pour quelle se mette en marche (fini les problèmes de démarrages pendant les temps froids d'hiver) ;
- L'indépendance vis-à-vis du pétrole.

I.9.2 Inconvénients

Comme la voiture électrique possède plusieurs avantages, elle a aussi des cotés négatifs :

- Question autonomie ;
- Sans oublier que la voiture se doit d'être la plus légère possible : plus la masse du véhicule augmente, plus il demande d'énergie, et donc moins il circule longtemps ;
- D'autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé ;
- Ainsi la durée de recharge des batteries électriques est encore importante. De plus, lors de l'utilisation, le moteur électrique ne produit pas de chaleur. L'habitacle de la voiture n'est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les fondements des véhicules électriques rechargeables (VER) et leur lien avec l'énergie photovoltaïque. On a présenté leur l'historique de ce type de véhicule, leurs types (PHRV, BEV...etc.) et leurs principaux composants. On a exploré également l'intégration de panneaux solaires dans les VER, illustré par l'exemple de la Hyundai-ioniq5. Ce chapitre analyse ensuite le potentiel de l'énergie solaire en Algérie, soulignant l'intérêt d'une telle ressource dans le contexte de la mobilité durable.

Dans le chapitre 2 on va développer une modélisation complète des principaux composants d'un véhicule électrique équipé d'un système photovoltaïque embraqué. Cette modélisation inclura la dynamique du véhicule, la production d'énergie solaire, le stockage par batterie, ainsi que l'utilisation d'un algorithme MPPT. L'objectif est de mettre en équation l'ensemble du système afin de poser les bases d'une optimisation future, en tenant compte des conditions réelles de conduite.



Chapitre II : Modélisation des principaux composants de véhicule électrique rechargeable

II.1 Introduction

Face à la raréfaction des ressources fossiles et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, le véhicule électrique rechargeable (VER) s'impose comme une alternative prometteuse aux véhicules thermiques traditionnels. Pour améliorer ses performances, optimiser son autonomie et intégrer des sources d'énergie renouvelables comme le photovoltaïque, il est essentiel de comprendre et de modéliser précisément ses différents composants.

Ce chapitre s'intéresse à la modélisation des éléments clés d'un véhicule électrique rechargeable, notamment la dynamique du véhicule, le générateur photovoltaïque et la batterie.

Ces modélisations permettent de simuler le comportement global du véhicule, d'analyser ses besoins énergétiques et d'explorer des solutions pour améliorer son rendement et son autonomie.

II.2 Dynamique de véhicule électrique

La modélisation d'un véhicule électrique commence par l'analyse des forces qui influencent son déplacement. Ces forces déterminent les besoins en puissance et en couple du moteur, et sont essentielles pour simuler le comportement dynamique du véhicule. Leur bonne estimation permet de dimensionner correctement les composants de traction et d'optimiser la consommation énergétique selon les conditions de conduite (accélération, pente, freinage).

II.2.1 Force aérodynamique

Est la force exercée par l'air sur un véhicule en mouvement, elle est exercée contre le mouvement du véhicule et dépend de nombreux facteurs :

$$F_{aéro} = \sin(V_{veh}) \times 0.5 \times \rho \times C_x \times S_f \times (V_{veh} + V_{ven})^2 \quad (II.1)$$

- C_x : Coefficient de trainée ;
- S_f : Surface frontale (m^2), calculée comme suit :

$$S_f = 1.6 + 0.00056 \times (M_{veh} - 765) \quad (II.2)$$

- V_{veh} : Vitesse du véhicule (m/s) ;
- V_{ven} : Vitesse du vent (m/s) ;
- ρ : Généralement, est pris égal à $1,23 \text{ kg} / m^3$, Cela dépend de la hauteur et de la température. En revanche, le coefficient de pénétration dans l'air varie

Chapitre II : Modélisation des principaux composants de véhicule électrique rechargeable

considérablement, par exemple pour les véhicules des passagers est d'environ 0,3 à 0,5 [19].

II.2.2 Force de roulement (F_{roul})

La force de roulement est la force de résistance exercée au point de contact entre les roues et la terre, et laquelle est proportionnelle avec le poids du véhicule.

$$F_{roul} = F_r \times M_{veh} \times g \quad (II.3)$$

- M_{veh} : Masse du véhicule (kg) ;
- F_r : Coefficient de roulement (souvent entre 0.01 et 0.015) ;
- g : Accélération gravitationnelle (9.81 m/s²).

II.2.3 Force de pente (force du profil de route (F_{prof}))

Est la force requise pour un véhicule de masse M_{veh} pour vaincre une pente θ .

$$F_{prof} = M_{veh} \times g \times \sin \theta \quad (II.4)$$

- θ : Angle de la pente (rad)

II.2.4 Force due au passage dans un tunnel ()

Il s'agit d'une force de résistance supplémentaire qui fonctionne dans un véhicule en mouvement dans un tunnel, causée par la compression de l'air entre le véhicule et les murs des tunnels. Cette résistance ralentit le véhicule et se développe rapidement parce que l'air a moins d'espace pour économiser.

$$F_g = K_t \times A_f \times v^2 \quad (II.5)$$

- K_t : Coefficient tunnel ;
- A_f : Surface frontale (m²) ;
- v : Vitesse du véhicule (m/s).

II.2.5 Somme des forces résistantes (F_{res})

Représente l'ensemble des forces qui s'opposent au mouvement d'un véhicule lors de son déplacement. Elle est généralement exprimée comme la somme de plusieurs composantes principales :

$$F_{res} = F_{roul} + F_{prof} + F_{aéro} + F_g \quad (II.6)$$

II.2.6 Equations de la dynamique du véhicule

$$\delta \times M_{veh} \times \alpha = F_t - F_r \quad (II.7)$$

F_t : Force de traction

- δ : Un coefficient sans dimension légèrement supérieur à 1, ce qui augmente la masse du véhicule pour prendre en compte l'inertie de la rotation comme les roues, grande, actifs

Chapitre II : Modélisation des principaux composants de véhicule électrique rechargeable

et rotors du moteur électrique. Pour les véhicules privés, le coefficient peut être calculé en utilisant la relation empirique suivante [20] :

$$\delta = 1.04 + 0.0025k^2 \quad (\text{II.8})$$

- : Accélération du véhicule (m/s^2) ;
- K : rapport de réduction de la transmission.

II.2.7 Application numérique sur le véhicule électrique de la marque Hyundai ionique 5

Tableau II.1 Paramètres de véhicule utilisé

Paramètres	Valeur
M	2100 Kg
F_r	0.012
C_x	0.288
S_f	2.99m^2
ρ	1.225kg/m^3
R_r	0.34m
V_{veh}	5011.39
V_{ven}	m/s
A_f	10 m/s.
G	2.88 m^2
	9.81m/s^2

Pour une route plate

Sachant que l'accélération $\alpha=0\text{m/s}^2$ (roulement à une vitesse constante) sur une route plate ($\theta=0$)

➤ Calcul des forces :

- Force aérodynamique($F_{aéro}$)

$$F_{aéro} = \frac{1}{2} \times \rho \times C_x \times S_f \times (V_{veh} + V_{vent})^2$$

$$F_{aéro} = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 0.288 \times 2.99 \times (51.39 + 10)^2$$

$$F_{aéro} = 1987.76 \text{ N}$$

- Force de roulement (F_{roul})

$$F_{roul} = F_r \times M \times g$$

$$F_{roul} = 0.012 \times 2100 \times 9.81$$

Chapitre II : Modélisation des principaux composants de véhicule électrique rechargeable

$$F_{\text{roul}} = 247.212 \text{ N}$$

- **Force de pente (F_{pente})**

$$F_{\text{pente}} = M \times g \times \sin \theta$$

$$F_{\text{pente}} = 2100 \times 9.81 \times 0$$

$$F_{\text{pente}} = 0 \text{ N}$$

- **Force due au passage dans tunnel ()**

$$F_g = K_t \times A_f \times V^2$$

Le coefficient de trainée dans un tunnel (K_t) dépend des conditions spécifiques, mais une approximation courante est 1,2 fois la résistance aérodynamique standard est faite ($K_t \approx 1.2$).

$$F_g = 1.2 \times 2.88 \times (51.39)^2$$

$$F_g = 9127.061 \text{ N}$$

- **Somme des forces résistantes (F_{res})**

$$F_{\text{res}} = F_{\text{roul}} + F_{\text{aéro}} + F_{\text{pente}} + F_g$$

$$F_{\text{res}} = 1987.76 + 247.212 + 0 + 9127.061$$

$$F_{\text{res}} = 11362.033 \text{ N}$$

Pour une route inclinée de 15%

- **Détermination de l'angle de la pente**

Une pente de 15% signifie que pour chaque 100m parcourus horizontalement, la hauteur augmente de 15m

L'angle est donné par :

$$\tan \alpha = \frac{15}{100} = 0.15$$

$$\alpha = \tan^{-1}(0.15) = 8.53^\circ$$

- **Calcul de la force résistante**

- **Force de roulement**

$$F_{\text{roul}} = F_r \times M \times g \times \cos \alpha$$

$$F_{\text{roul}} = 0.012 \times 2100 \times 9.81 \times \cos(8.53)$$

$$F_{\text{roul}} = 244.477 \text{ N}$$

Chapitre II : Modélisation des principaux composants de véhicule électrique rechargeable

- **Force aérodynamique**

$$F_{aéro} = \frac{1}{2} \times \rho \times C_x \times S_f \times (V_{veh} + V_{vent})^2$$

$$F_{aéro} = \left[\frac{1}{2} \times 1.225 \times 0.288 \times 2.99 \times (51.39 + 10)^2 \right]$$

$$F_{aéro} = 1987.76 \text{ N}$$

- **Force gravitationnelle due à la pente**

$$F_{pente} = M \times g \times \sin \alpha$$

$$F_{pente} = 2100 \times 9.81 \times \sin(8.53)$$

$$F_{pente} = 3055.689 \text{ N}$$

- **Force due au passage dans un tunnel**

$$F_g = K_t \times A_f \times v^2$$

$$F_g = 1.2 \times 2.88 \times (51.39)^2$$

$$F_g = 9127.061 \text{ N}$$

- **Somme des forces résistantes**

$$F_{res} = F_{roul} + F_{aéro} + F_{Pent} + F_g$$

$$F_{res} = 1987.76 + 244.477 + 3055.689 + 9127.061$$

$$F_{res} = 14414.987 \text{ N}$$

- **Calcul du couple aux roues :**

$$C_{roues} = F_{total} \times R_r \quad (II.9)$$

$$C_{roues} = 14414.987 \times 0.34$$

$$C_{roues} = 4901.09 \text{ N.m}$$

➤ **La puissance nécessaire pour vaincre les force résistantes est donnée par**

Transformation de la vitesse linéaire v en vitesse angulaire ω (rad /s)

$$\omega = \frac{v}{R_r} \quad (II.10)$$

Calcul :

$$\omega = \frac{51.39}{0.34}$$

Chapitre II : Modélisation des principaux composants de véhicule électrique rechargeable

$$\omega = 151.147 \text{ rad/s}$$

$$P_{\text{nécessaire}} = C_{\text{roues}} \times \omega \quad (\text{II.11})$$

$$P_{\text{nécessaire}} = 4901.09 \times 151.147$$

$$P_{\text{nécessaire}} = 740785,05 \text{ W} = 740.785 \text{ KW}$$

➤ Calcul de la puissance que doit développer le moteur

$$P_{\text{Moteur}} = \frac{P_{\text{nécessaire}}}{\eta} \quad (\text{II.12})$$

Si on prend un rendement moyen de transmission d'ordre de 90%

$$P_{\text{moteur}} = \frac{740785,05}{0.9}$$

$$P_{\text{moteur}} = 823.0945 \text{ K W}$$

II.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Une cellule solaire peut être modélisée de différentes manières, chaque modèle étant direct par une expression mathématique (analytique) qui dépend des paramètres technologiques de la cellule, tels que le courant et la tension. Le circuit équivalent le plus couramment utilisé pour représenter une cellule photovoltaïque, est représenté sur la (figure II .1)

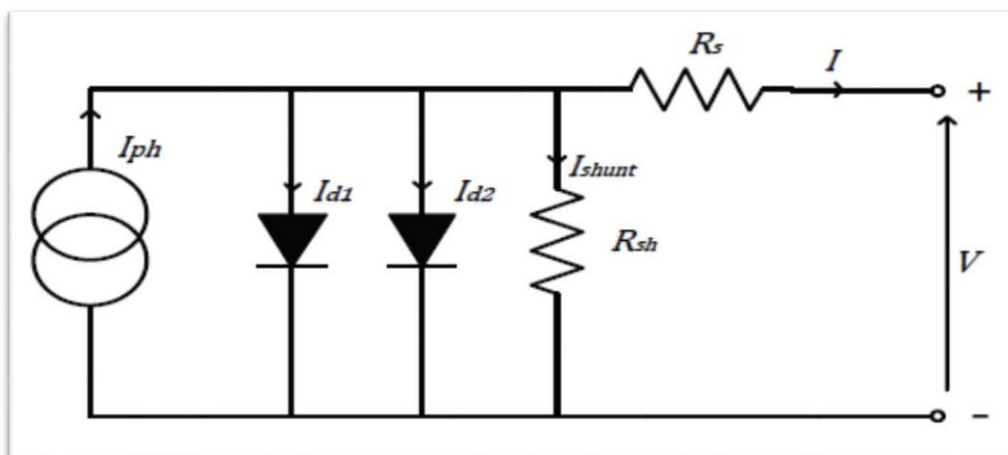


Figure II.1 Modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

D'après le schéma présenté à la (figure II.1), une photopile peut être modélisée par une résistance en série R_s ainsi qu'une résistance en shunt R_{sh} . Ces deux éléments influencent la caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule.

- La résistance série correspond à l'ensemble des résistances internes, incluant celle du

Chapitre II : Modélisation des principaux composants de véhicule électrique rechargeable

matériau semi-conducteur, la résistance de contact entre les grilles collectrices, ainsi que la résistivité des grilles elles-mêmes ;

- La résistance de shunt traduit les pertes dues aux courants de fuite au niveau de la jonction, dépendant des conditions de fabrication de celle-ci.

Selon la (figue II.1), le modèle mathématique décrivant la relation courant-tension de la photopile est exprimé par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot (e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_1 K T}} - 1) - I_{s2} \cdot (e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_2 K T}} - 1) - \frac{V+IR}{R_{sh}} \quad \text{II.13}$$

Où :

- I_{et} : Courant et tension de sortie de la cellule photovoltaïque.
- I_{ph} : Photo-courant produit.
- I_{s1} et I_{s2} : Les courants de saturation des diodes.
- n_1 et n_2 : Les facteurs de pureté de la diode.
- R_{set} : R_p Respectivement la résistance série et la résistance parallèle.
- T : Température absolue en Kelvin.
- Q : Charge élémentaire constante ($1.602 \cdot 10^{-19}C$).
- K : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}J/k$).
- Le photo-courant I_{s} est atteint à une insolation maximum, souvent on a $I_{ph} = S \cdot I_{phmax}$;

Avec S : Pourcentage d'insolation.

L'équation (2.13) montre clairement que la relation courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température. Cette dépendance est accentuée par les caractéristiques du photo-courant ainsi que par les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnée par :

$$I_{ph}(T) = I_{ph_{T=298}} \cdot (1 + (T - 298.K) \cdot (5 \cdot 10^{-4})) \quad \text{(II.14)}$$

$$I_{s1} = K_1 \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{KT}} \quad \text{(II.15)}$$

$$I_{s2} = K_2 \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{KT}} \quad \text{(II.16)}$$

Où:

E_g : Bande d'énergie du semi-conducteur, $K_1 = 1.2A/cm^2.k^3$, $K_2=2.9A/cm^2.k^{5/2}$

II.3.1 Simulation et interprétation des courbes le mode

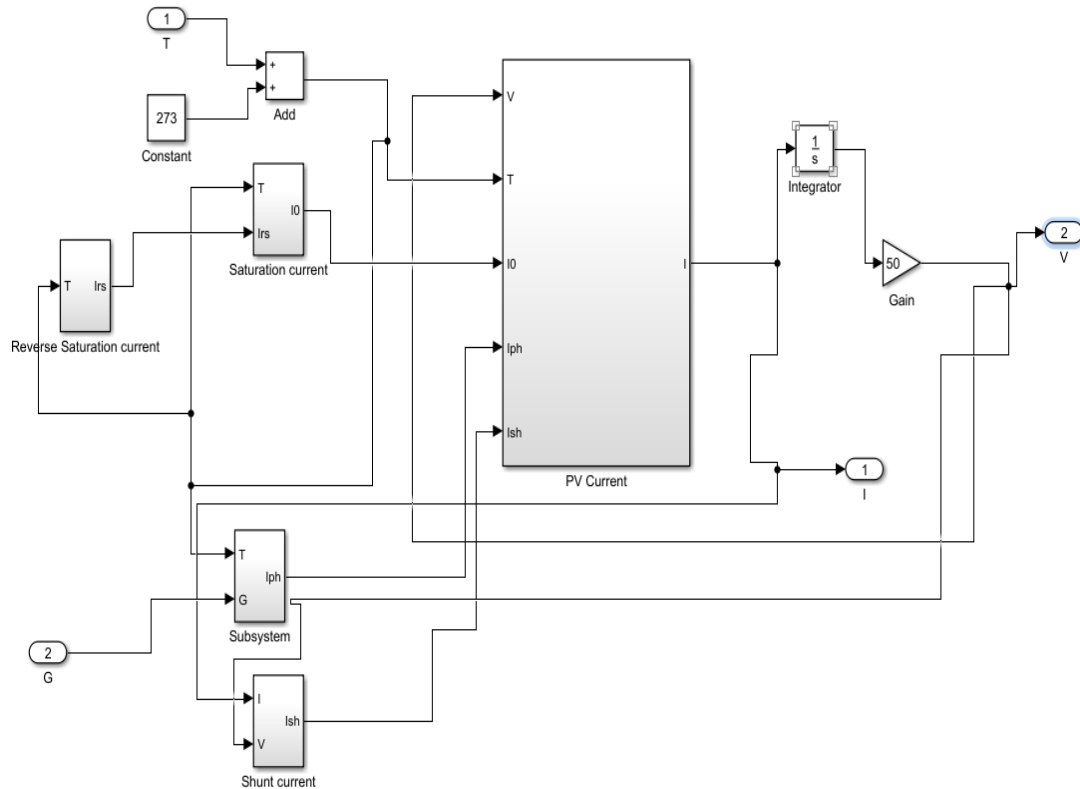


Figure II.2 Schéma bloc d'un générateur photovoltaïque

II.3.1.1 Influence de l'ensoleillement

Les courbes obtenues à travers la simulation de modèle mathématique pour les différentes valeurs de l'ensoleillement :

Comme nous pouvons le constater à partir de la figure 2.3, le courant de PV dépend fortement de l'irradiation solaire. Cependant, la tension augmente de 1V quand l'irradiation solaire est passée de 400 W/m² à 1000 W/m².

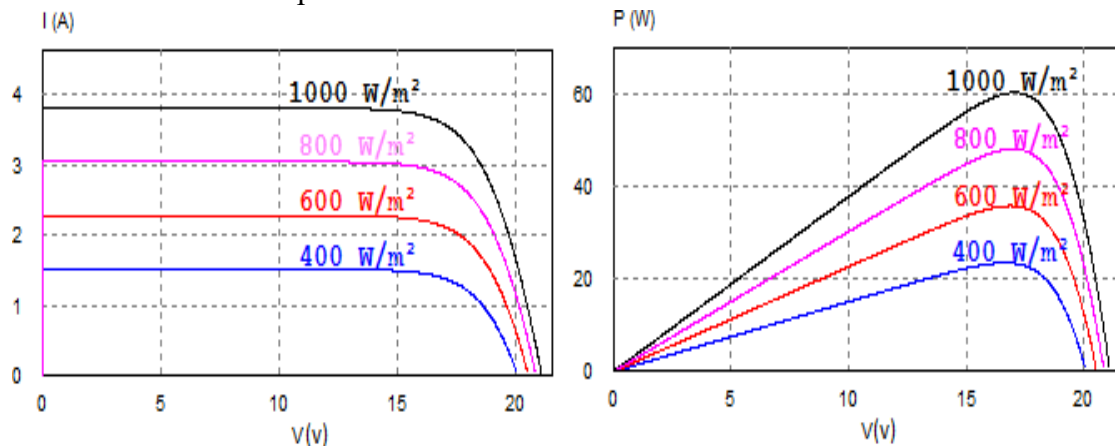


Figure II.3 Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation

I.3.1.2 Influence de la température

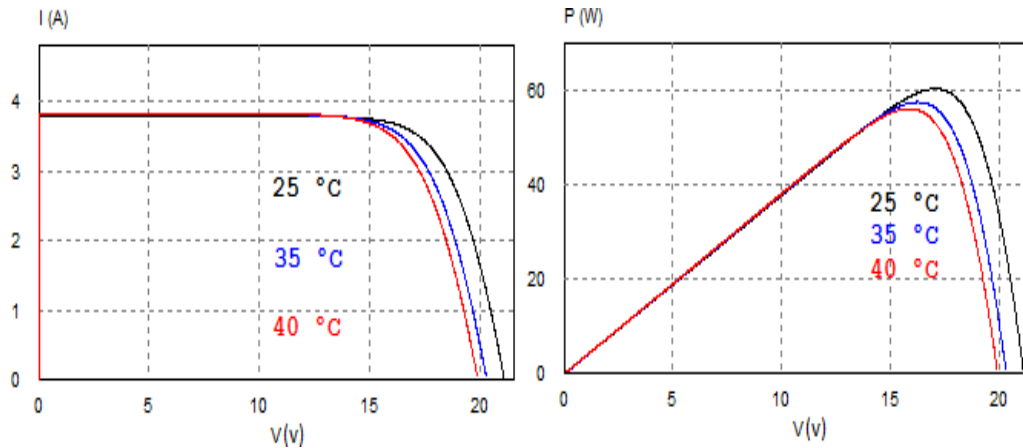


Figure II.4 Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation

II.4 Modélisation de la batterie

La modélisation d'une batterie lithium-ion vise à représenter son comportement électrique et dynamique de manière précise. Elle s'appuie principalement sur deux approches : les modèles de circuits équivalents, simples et intuitifs, et la représentation d'état, plus mathématique et adaptée au suivi du SOC et au contrôle. Ces outils sont essentiels pour optimiser les performances et la gestion des systèmes de stockage.

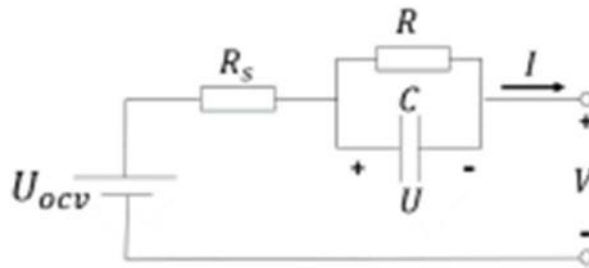


Figure II.5 Modèle électrique équivalent d'une batterie

Les équations électriques qui définissent ce modèle sont les suivantes :

$$V = U_{ocv} - R_s \cdot I - U \quad (II.17)$$

$$U = \frac{1}{RC} U + \frac{1}{C} I \quad (II.18)$$

U_{ocv} : La tension du circuit ouvert ;

V : La tension de sortie de la batterie ;

U : La tension aux bornes de la capacité.

Chapitre II : Modélisation des principaux composants de véhicule électrique rechargeable

Dans le fonctionnement de la batterie normale (entre 10% et 90% SOC), la tension de l'évolution du circuit ouvert variée linéairement en fonction de l'état de charge de la batterie qui peut être écrit sous la forme suivante :

$$U_{ocv} = a \cdot SOC + b \quad (II.19)$$

En conséquence, nous déterminons le vecteur d'état qui comprend l'état de charge et la tension. On considère les variables d'état au niveau des bornes de la capacité :

$$X(t) = \begin{pmatrix} SOC(t) \\ U(t) \end{pmatrix} \quad (II.20)$$

L'expression de l'état de charge d'une batterie à un instant t est donnée par l'équation suivante :

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^t I dt}{Q_0} \quad (II.21)$$

Où le SOC_0 est l'état initial de la charge, Q_0 est la capacité de batterie actuelle et I est le courant mesurer lors du chargement ou de déchargement de la batterie

Et on peut écrire à partir de l'équation (19) et (17)

$$\begin{bmatrix} \dot{SOC} \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC \\ U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{Q_0} \\ \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot I \quad (II.22)$$

En remplaçant l'équation(19) dans (17) on obtient :

$$V = [a \quad -1] \cdot \begin{bmatrix} SOC \\ U \end{bmatrix} - R_s I + b \quad (II.23)$$

Finalement le modèle global est :

$$dx = [A] \cdot x + [B] \cdot I \quad (II.24)$$

$$V = [C] \cdot x + [D] \cdot I + b \quad (II.25)$$

Avec :

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Q_0} \\ \frac{1}{RC} \end{bmatrix}, [C] = [a \quad -1], [D] = -R_s \quad (II.26)$$

$$X = \begin{bmatrix} SOC \\ U \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

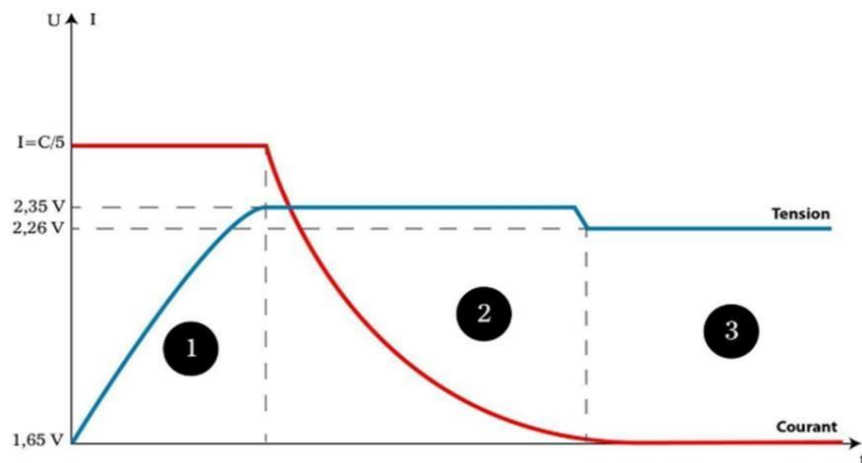


Figure II.6 L'évolution de la tension

II.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de développer une modélisation complète des composants principaux d'un véhicule électrique intégrant un système photovoltaïque embarqué. En combinant la dynamique du véhicule, la production d'énergie solaire et le stockage par batterie et l'utilisation d'un algorithme MPPT, nous avons mis en évidence la faisabilité de mise en équation d'un système complet. Cette approche offre une base solide pour l'optimisation future des véhicules électriques solaires, en tenant compte des conditions réelle de conduite et d'ensoleillement.



III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats de simulation portant sur les performances d'un véhicule électrique équipé de panneaux solaire et d'une batterie, selon trois profils de conduite : urbain, semi-urbain, et routier. L'étude considère plusieurs facteurs tels que l'ensoleillement, la pente de la route, la vitesse du vent et la température ambiante. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre comment optimiser la gestion énergétique du véhicule en fonction des conditions de conduite et des variations environnementales.

III.2 Simulation et interprétation des résultats

Pour la simulation, nous avons utilisé un micro-ordinateur portable (HP). Les programmes développés concernent la mise en œuvre des modèles mathématiques des systèmes suivants :

- Véhicule électrique ;
- La commande MPPT (Perturbation et observation) ;
- Générateurs photovoltaïques ;
- La batterie.

III.2.1 Véhicule en cas de circulation (en route)

Dans cette section, nous étudions le comportement du véhicule électrique solaire en conditions réelles de circulation. L'objectif est d'analyser l'impact des variations de vitesse, de température et d'ensoleillement sur la performance du système, tout en évaluant la contribution des panneaux photovoltaïques à la traction. L'analyse portera sur différents cycles de conduite (urbain, semi-urbain, routier) à travers des paramètres clés tels que le couple résistant, la puissance, ainsi que les courants et tensions optimaux des panneaux, et leur contribution énergétique.

III.2.1.1 Première étude : cycle urbain

L'étude 1 porte sur le cycle urbain de 0 km/h à 40 km/h, dans lequel :

- La température est variée de 248.15 K à 318.15 K ;
- La vitesse de vent est variée de 0 km/h à 20 km/h. ;
- La pente de la route est variée de 0 % à 15%.

a- 1^{er} cas : Pour un l'ensoleillement important qui varie de 900 W/m^2 à 1000 W/m^2 .

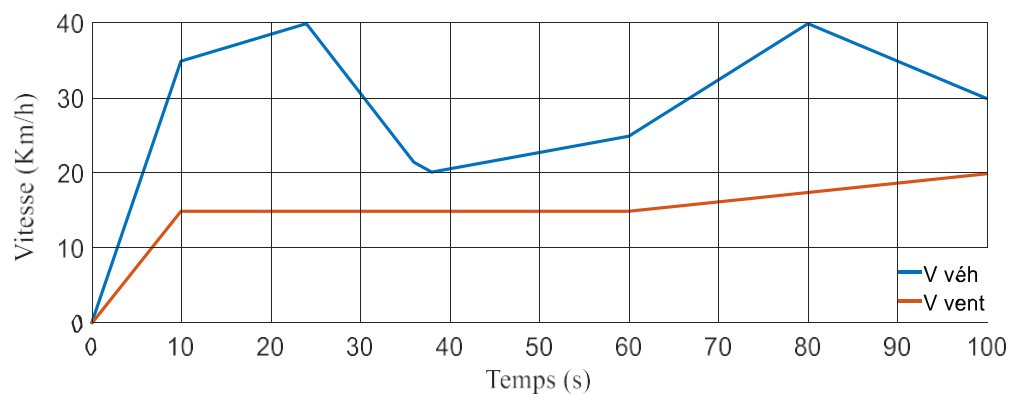


Figure III.1 Profil de vitesse de véhicule et de vent en fonction de temps

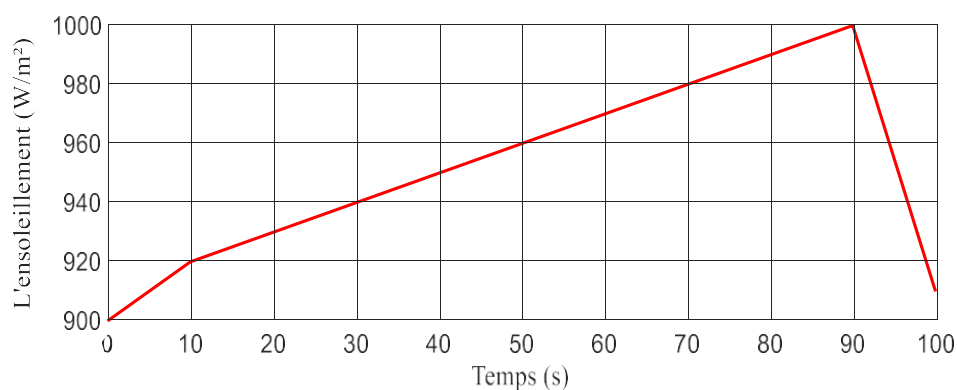


Figure III.2 Variation de l'ensoleillement en fonction de temps

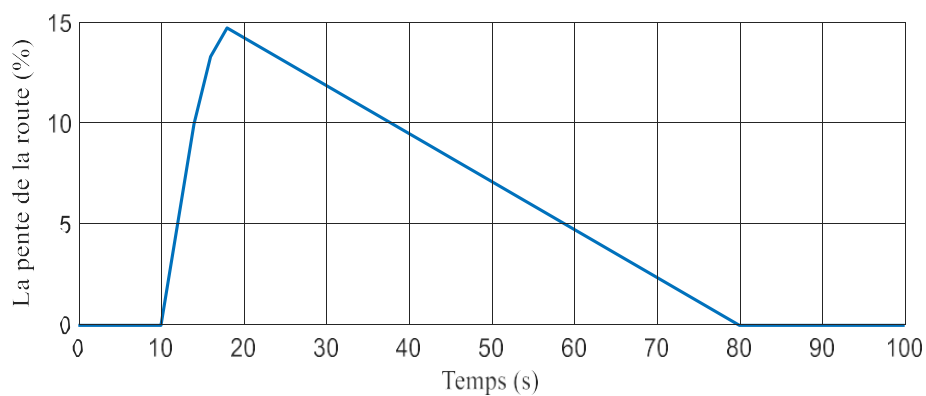


Figure III.3 Pente de la route en fonction de temps

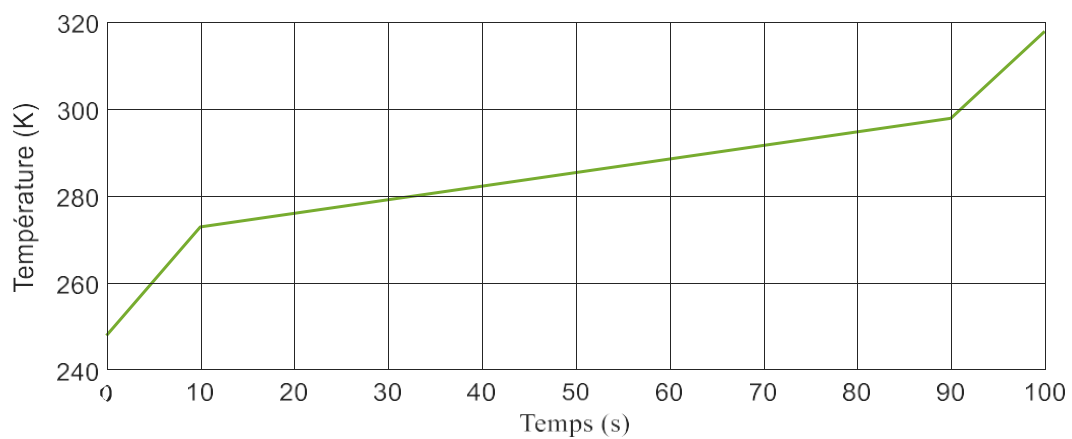


Figure III.4 Variation de température en fonction de temps

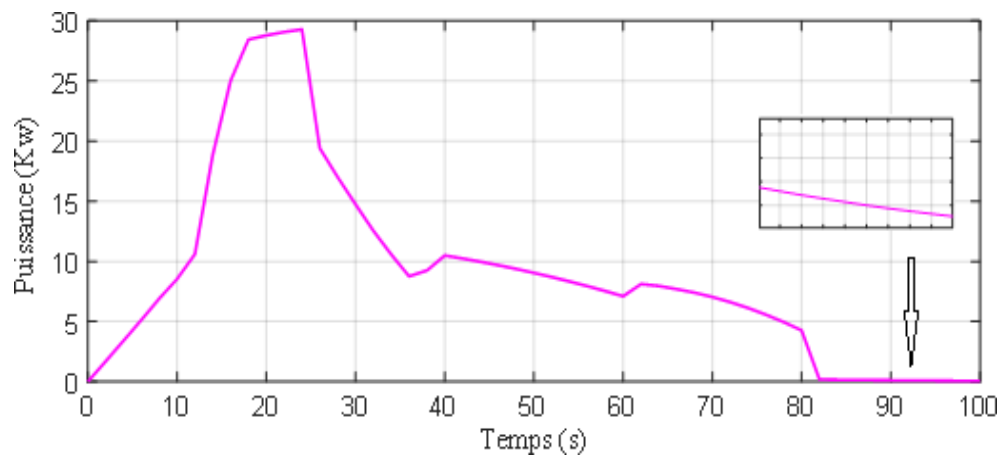


Figure III. 5 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps

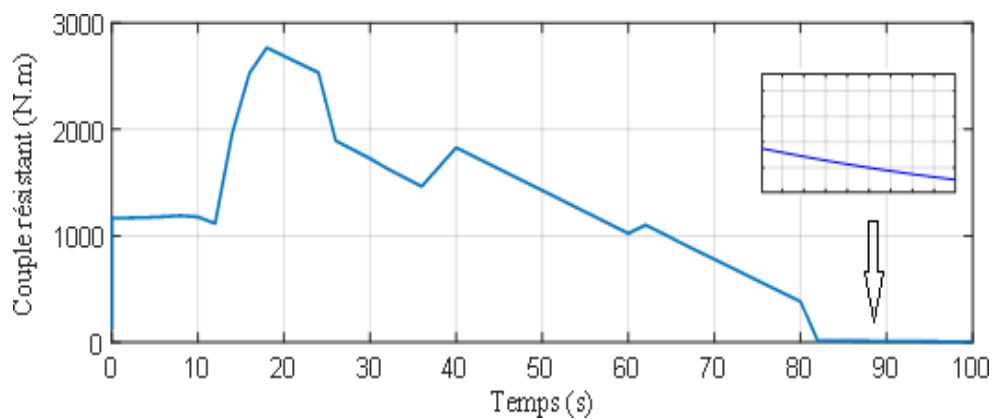


Figure III.6 Couple développé par moteur en fonction de temps

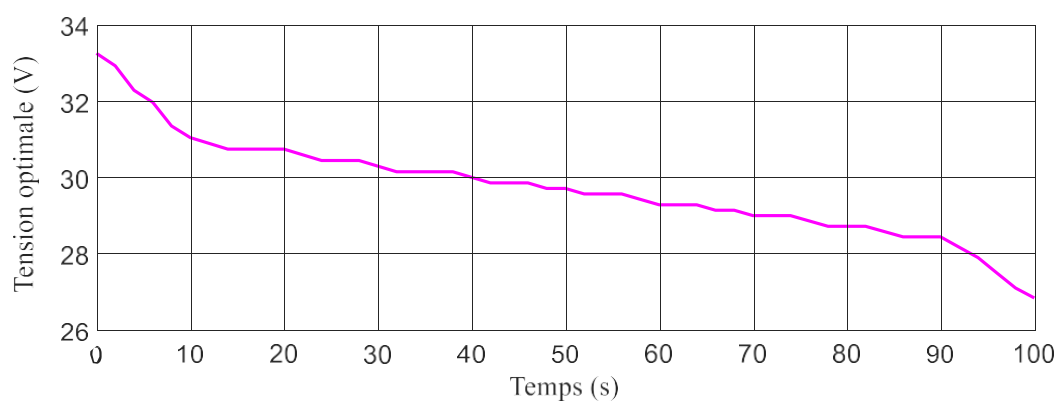


Figure III.7 Tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques

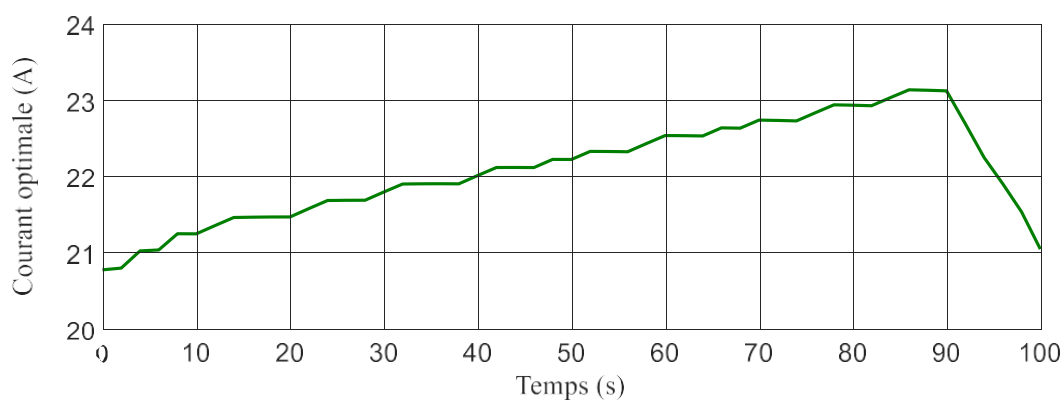


Figure III.8 Courant optimal délivré par les panneaux photovoltaïques

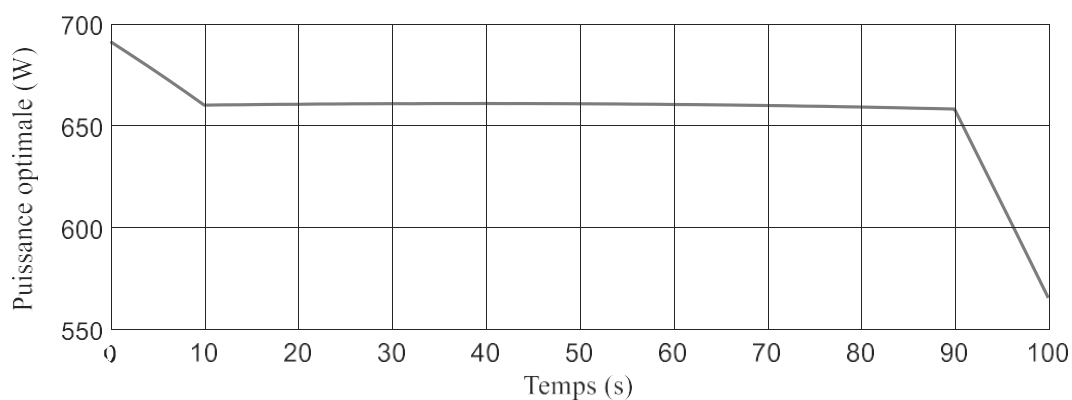


Figure III.9 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

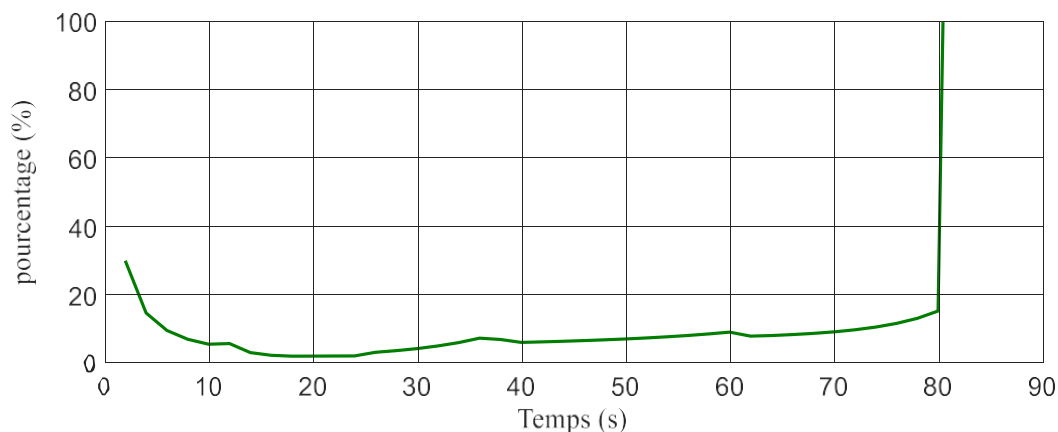


Figure III.10 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires :

- Dans cette simulation le profil de vitesse du véhicule choisis (Figure III.1) montre que le véhicule suit un profil de conduite urbain classique, alternant accélérations et décélérations, avec une vitesse de croisière autour de 30–40 km/h. Le vent reste faible (~10–15 km/h), avec une influence limitée ;
- On observe dans la figure III.7 une diminution progressive de la tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques, passant d'environ 33,5 V à 27 V. Cette baisse témoigne d'un ajustement dynamique du système pour maintenir un rendement énergétique optimal face aux variations environnementales ;
- La figure III.8 met en évidence une augmentation quasi linéaire du courant optimal délivré par les panneaux, évoluant de 20,5 A à près de 23,5 A sur la majeure partie du cycle. Une légère baisse s'observe en fin de période, ce qui reflète l'évolution de l'irradiation ou la réponse thermique du système ;
- Dans la figure III.9, la courbe de puissance délivrée par les panneaux reste relativement stable, autour de 670 à 650 W, durant la majeure partie de la simulation. Une chute rapide survient vers 90 secondes, atteignant environ 550 W, ce qui indique une période de production constante suivie d'une perte énergétique soudaine ;
- La figure III.10 illustre l'évolution du taux de contribution des panneaux photovoltaïques à la puissance requise pour la traction. On note une contribution initialement élevée (~25 %), qui chute rapidement pour se maintenir à un niveau très faible (<5 %) pendant une longue phase stable, avant de connaître un pic important (supérieur à 80 %) en fin de cycle. Ce comportement révèle une implication variable des panneaux selon les besoins instantanés du véhicule.

b- 2^{ème} cas : pour un ensoleillement moyen variant de 580 W/m^2 à 700 W/m^2 .

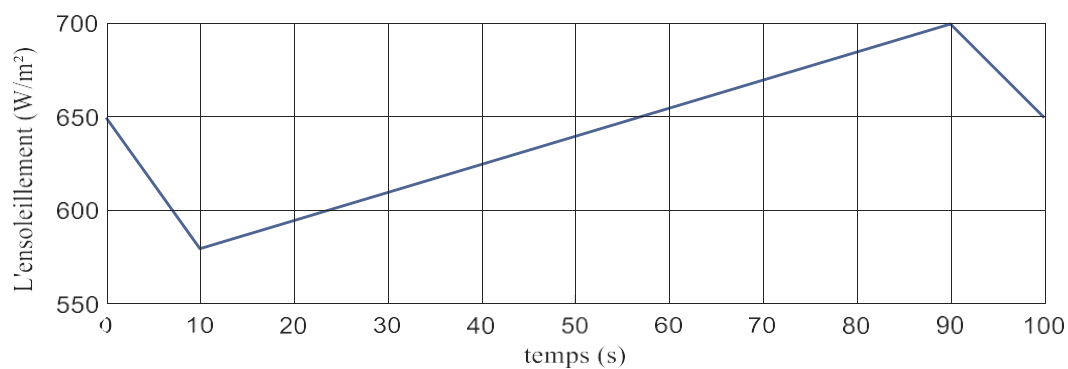


Figure III.11 Variation de l'ensoleillement en fonction de temps

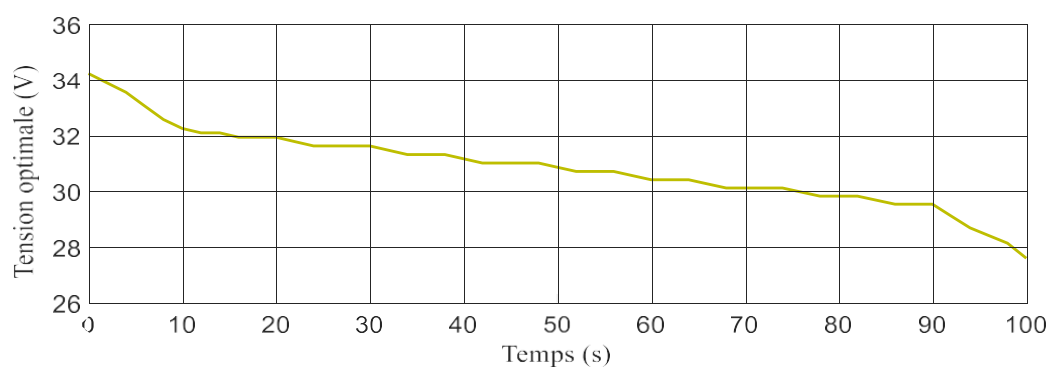


Figure III.12 Tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques

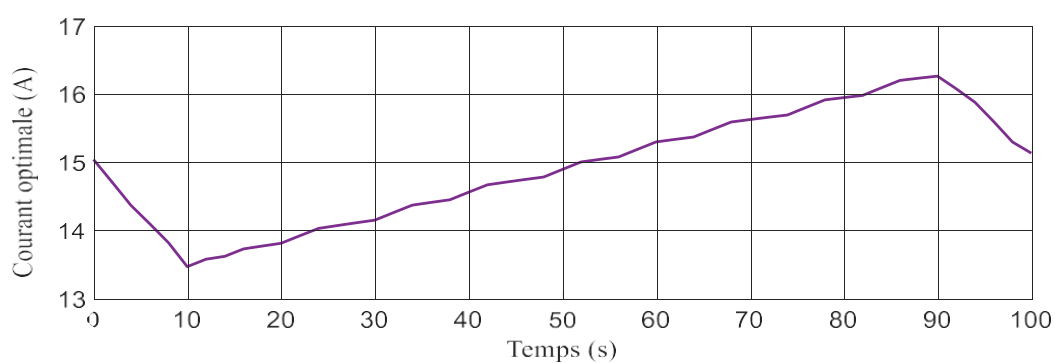


Figure III.13 Courant optimal délivré par les panneaux photovoltaïques

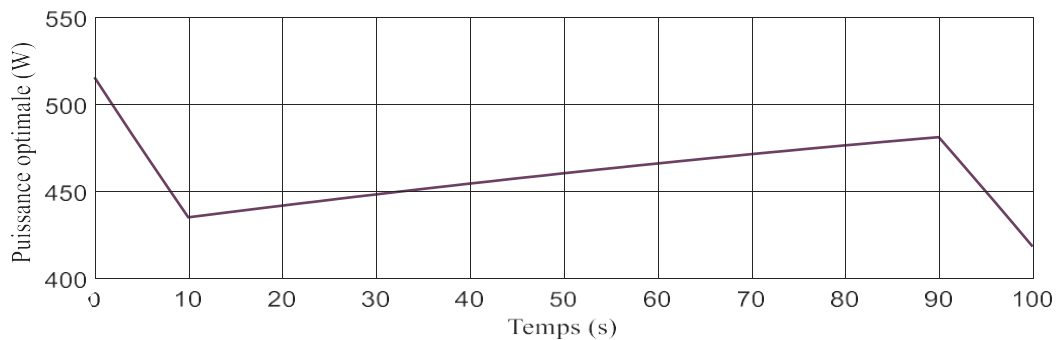


Figure III.14 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

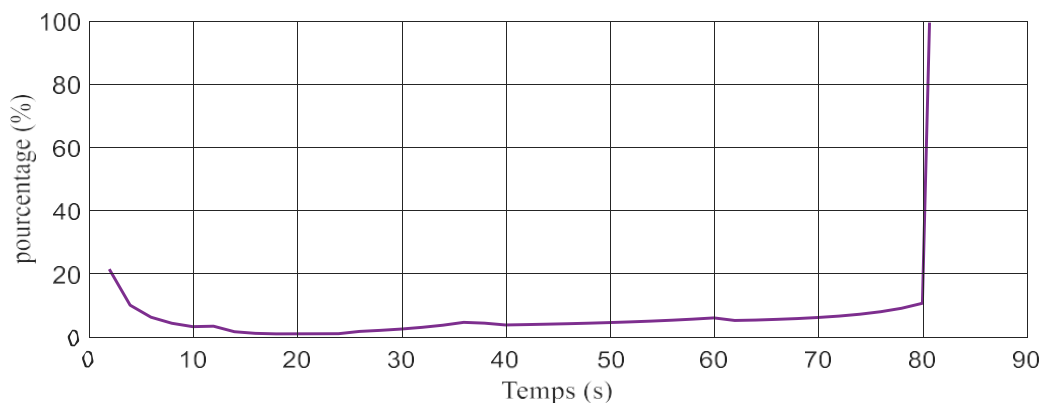


Figure III.15 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires :

- On constate à travers la figure III.12 une diminution continue de la tension optimale des panneaux photovoltaïques, passant de 34 V à 28 V sur une durée de 100 secondes. Cette baisse graduelle reflète une adaptation des conditions de fonctionnement du générateur PV, influencée par la température, l'irradiation solaire ou d'autres facteurs du système ;
- La Figure III.13 met en évidence un comportement dynamique du courant optimal : une légère baisse initiale de 15 A à 13,5 A est suivie d'une augmentation régulière atteignant un maximum supérieur à 16 A autour de 90 secondes, avant un léger repli. Ce profil suggère une phase transitoire suivie d'une amélioration des conditions de production du courant, corrélée à l'ensoleillement ;
- Il est possible de remarquer sur la Figure III.15 une évolution significative du taux de contribution des panneaux solaires à la puissance de traction électrique. Initialement estimée à 20 %, cette contribution chute presque à zéro pendant la majeure partie de la période. Ce n'est qu'aux alentours de 85 secondes qu'elle grimpe fortement jusqu'à frôler les 100 %, indiquant un basculement où les panneaux deviennent la source principale d'énergie. Ce comportement pourrait résulter d'une stratégie de gestion

énergétique adaptative ou d'une combinaison favorable entre haute l'irradiation solaire et faible demande énergétique.

c- 3^{ème} cas : pour un faible ensoleillement qui varie de 100 W/m^2 à 300 W/m^2 .

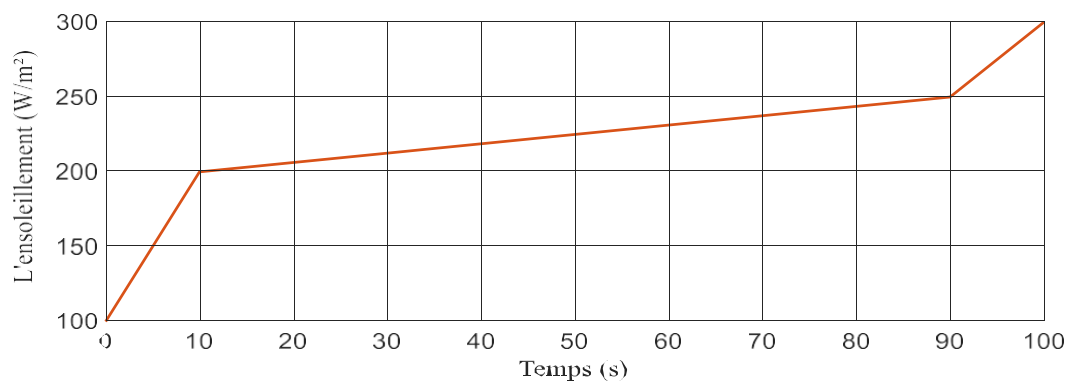


Figure III.16 Variation de l'ensoleillement en fonction de temps

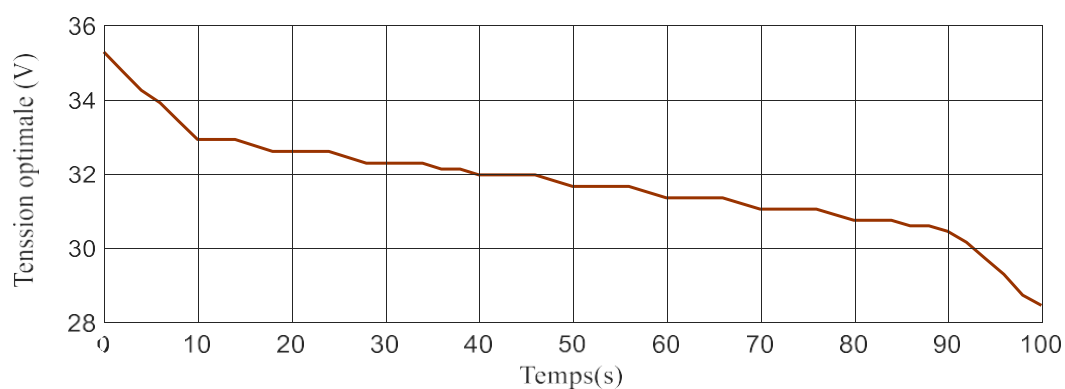


Figure III.17 Tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques

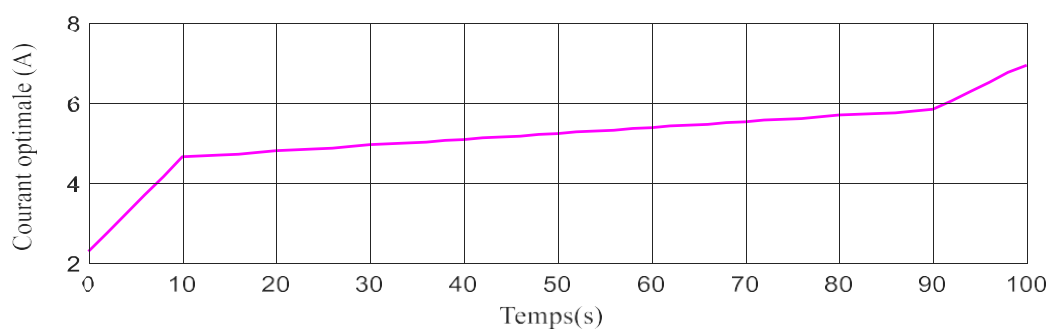


Figure III.18 Courant optimale délivrée par les panneaux photovoltaïques

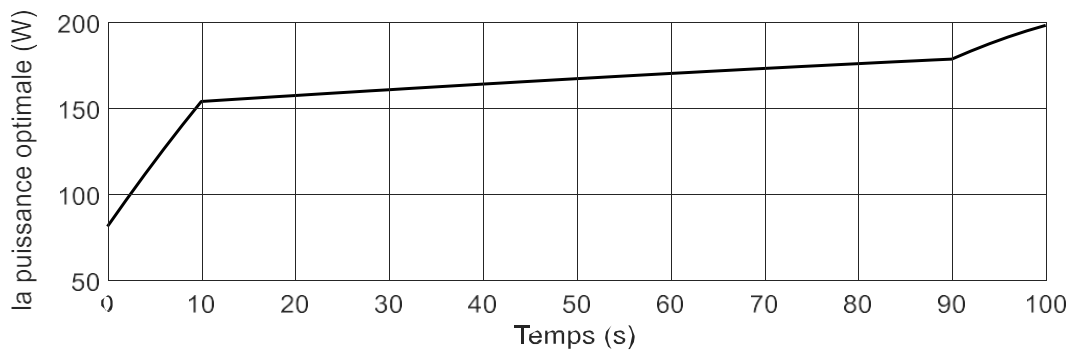


Figure III.19 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

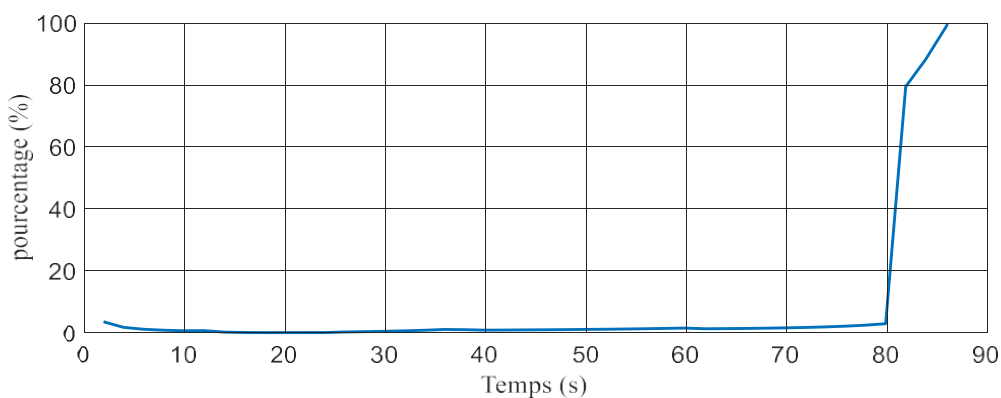


Figure III.20 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires:

- Pour un ensoleillement faible (Figure III.16) 100–300 W/m², simulant des conditions de faible luminosité (crépuscule ou forte couverture nuageuse). Cette valeur est bien inférieure à celles des deux cas précédents ;
- La courbe de la figure III.17 met en évidence l'évolution de la tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques, la tension démarre autour de 35 V au début du cycle, puis décroît progressivement pour atteindre environ 28 V à la fin des 100 secondes. Cette baisse régulière reflète une adaptation continue du système pour maintenir un fonctionnement proche du point de puissance maximale ;
- La figure III.18 illustre l'évolution du courant optimal au cours du temps. On constate une augmentation rapide durant les premières secondes, passant de 2 A à 4,5 A en 10 secondes, suivie d'une phase de stabilité autour de 4,5 A. Plus loin dans le cycle, aux environs de 100 secondes, la Figure III.18 met en évidence une nouvelle hausse significative du courant, atteignant 6,5 A, traduisant une amélioration notable de la production de courant ;
- La courbe de la figure III.19 présente la puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques. Comme on peut le voir dans la Figure III.19, la puissance initiale

augmente rapidement de moins de 50 W à 150 W, avant de continuer à croître lentement pour atteindre environ 170 W. Vers la fin du cycle, un pic remarquable proche de 200 W est observé, ce qui coïncide avec la montée du courant optimal ;

- Sur la figure III.20, on observe que le taux de contribution des panneaux solaires à l'effort de traction est négligeable (proche de 0 %) jusqu'à environ 80 secondes. Puis, une transition brutale s'opère : en l'espace de 10 secondes, cette contribution grimpe jusqu'à près de 100 %, révélant que les panneaux photovoltaïques prennent en charge presque entièrement la demande de puissance durant une phase très courte mais décisive du cycle.

III.2.1.2 Deuxième étude : cycle semi urbain

L'étude 2 porte sur le cycle semi urbain avec des vitesses variant de 30 Km/h à 80 Km/h, et dans lequel :

- La température est variée de 248.15 K à 318.15 K ;
- La vitesse de vent est variée de 0 km/h à 20 km/h ;
- La pente de la route est variée de 0 % à 6%.

a – 1^{er} cas : Pour un l'ensoleillement important qui varie de 900 W/m² à 1000 W/m².

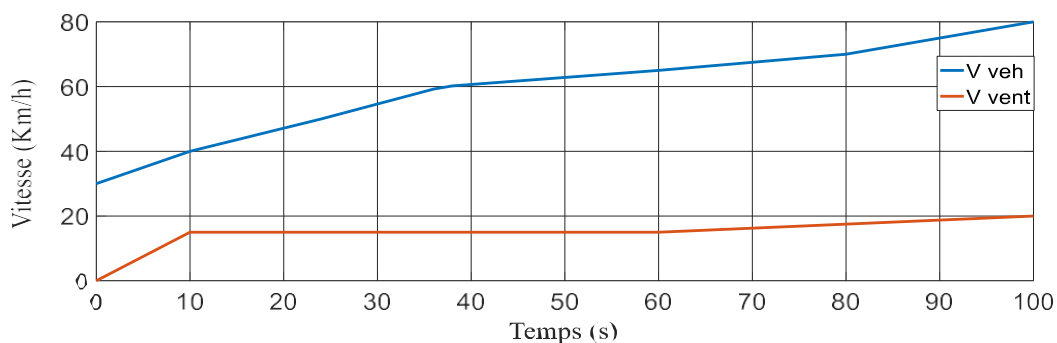


Figure III.21 Profils des vitesses de véhicule et de vitesse de vent en fonction de temps

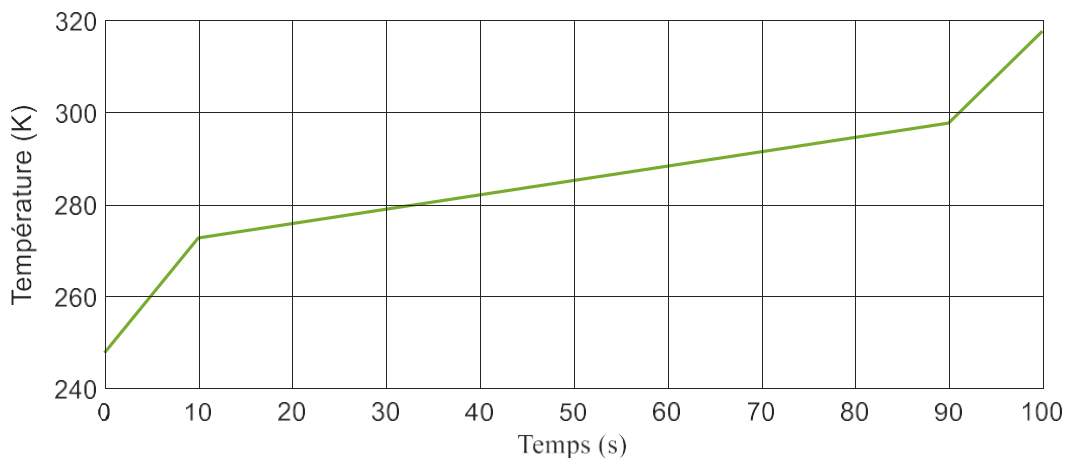


Figure III.22 Variation de température en fonction de temps

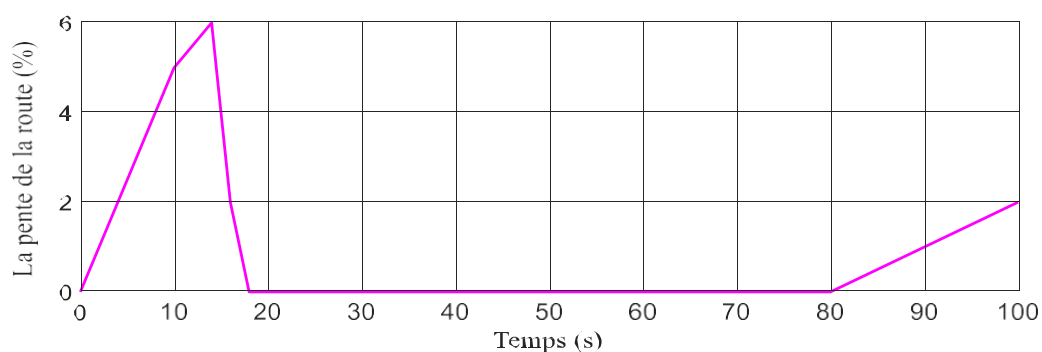


Figure III.23 Variation de pente de la route en fonction de temps

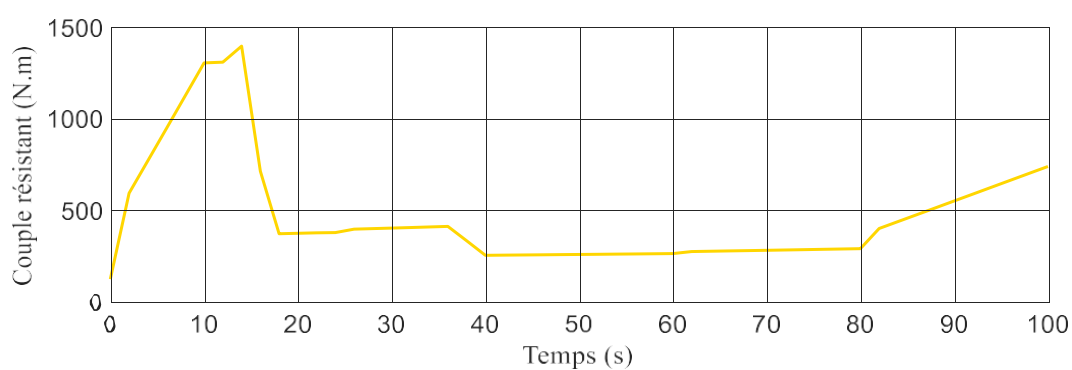


Figure III.24 Couple développé par moteur en fonction de temps

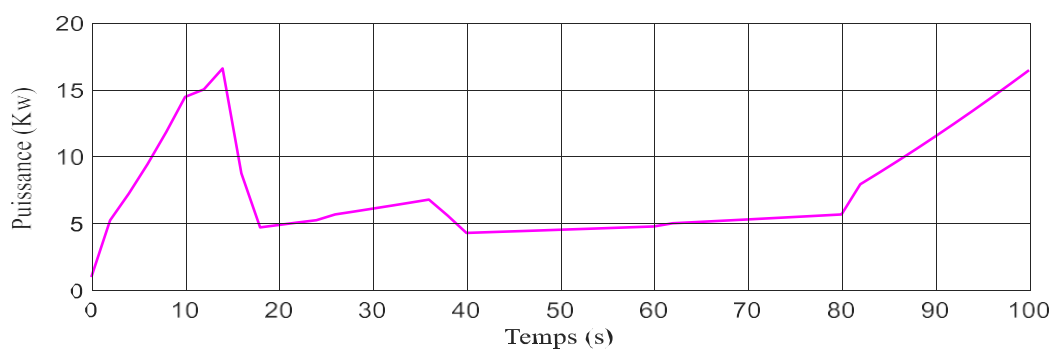


Figure III.25 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps

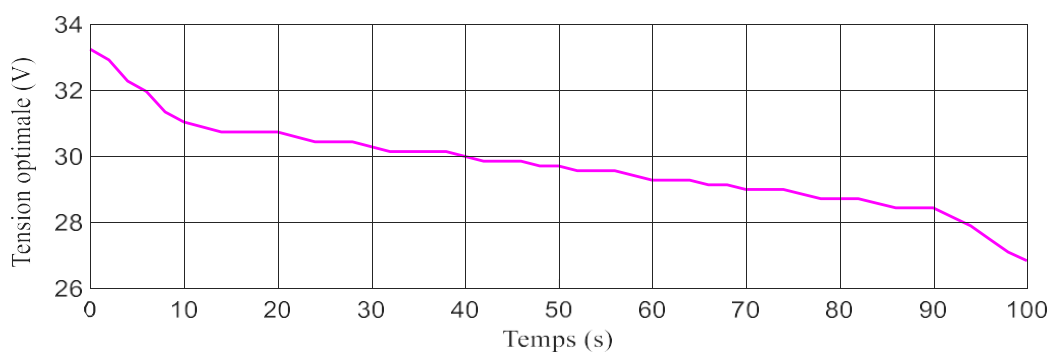


Figure III.26 Tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques

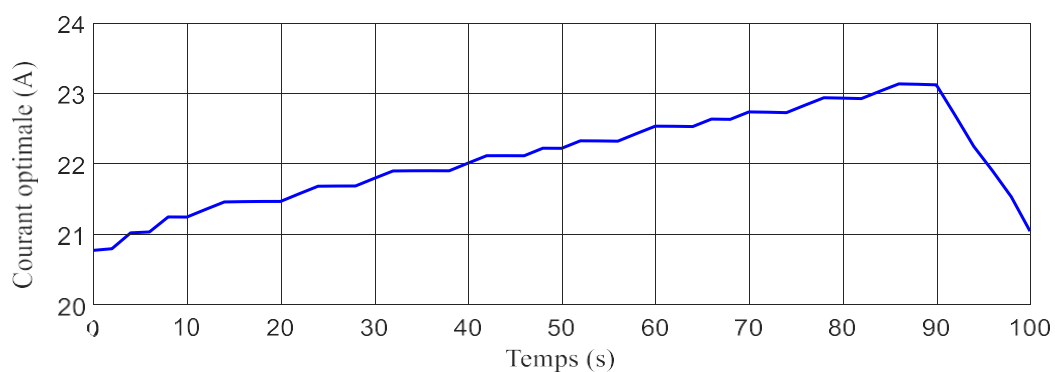


Figure III.27 Courant optimal délivrée par les panneaux photovoltaïques

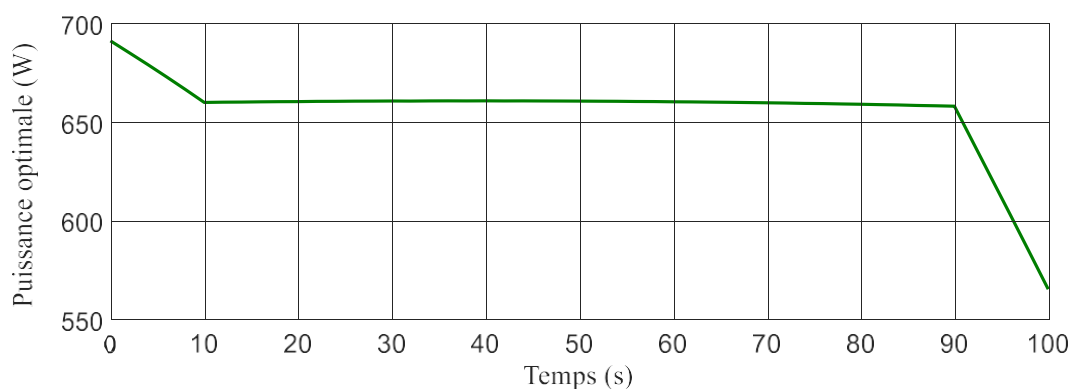


Figure III.28 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

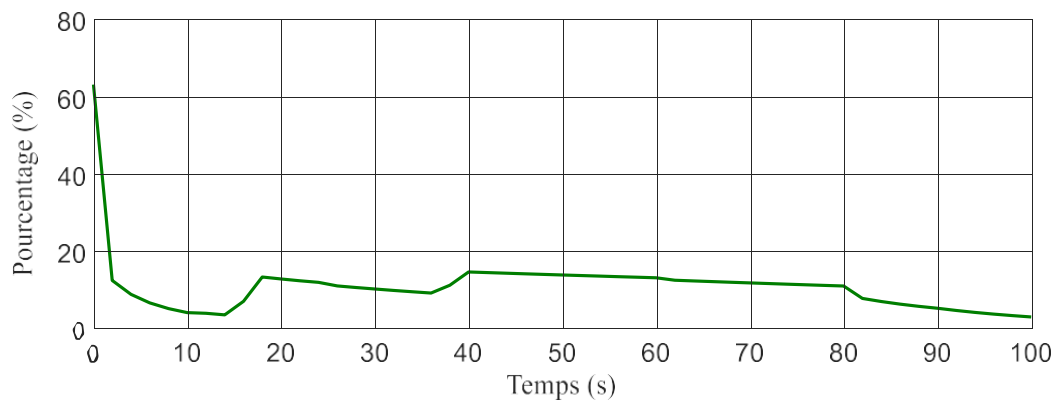


Figure III.29 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires :

- La figure III.21 met en évidence une accélération marquée du véhicule, passant d'environ 35 km/h à 75 km/h en l'espace de 100 secondes, alors que la vitesse du vent reste relativement stable, entre 15 et 20 km/h. Ce décalage croissant entre les deux vitesses indique que la résistance aérodynamique est principalement due au mouvement propre du véhicule ;
- La courbe de la figure III.23 met en lumière les variations de pente du terrain. On y distingue une montée abrupte à 6 %, suivie d'un retour rapide à une route plate, avant d'atteindre une pente progressive de 3 %. Ces changements successifs montrent un profil routier variable, alternant entre des zones de montée et de terrain plat ;
- On observe dans la figure III.24 que le couple résistant varie en fonction de la pente du terrain. Un pic est atteint à 1400 N.m lors d'une montée forte, suivi d'une baisse à 400 N.m sur terrain plat, puis d'une augmentation progressive jusqu'à 700 N.m. Ce comportement confirme que le couple est fortement influencé par l'inclinaison du profil routier ;
- La figure III.25 illustre l'évolution de la puissance en fonction du couple résistant, avec un pic à 16 kW lors d'une montée. Une stabilité autour de 5 kW est observée sur terrain plat, suivie d'une hausse progressive jusqu'à 14 W, indiquant que la consommation de puissance dépend directement de l'effort requis pour surmonter les pentes et de la dynamique du véhicule ;
- La figure III.26 montre une tension optimale qui décroît progressivement au fil du temps, ce qui suggère probablement une augmentation de la température des panneaux solaires ;
- On observe dans la figure III.27 une tendance générale à l'augmentation du courant optimal, suivie d'une légère baisse. Ce comportement reflète une bonne irradiation solaire initiale, ou une amélioration de celle-ci, avant une diminution progressive. Le courant est ainsi directement influencé par l'intensité lumineuse ;
- La Figure III.28 montre l'évolution de la puissance optimale d'un système photovoltaïque. Cette puissance reste stable pendant une période prolongée avant de Diminuer brusquement, en corrélation avec la baisse de l'ensoleillement. Ce comportement met en évidence la dépendance directe de la puissance optimale à l'énergie solaire disponible ;
- On observe dans la figure III.29 une chute brutale de la contribution des panneaux photovoltaïques, passant d'environ 70 % à près de 10 % dès le début du cycle. Par la suite, cette contribution se stabilise dans une plage oscillant entre 10 % et 30 %. Cette évolution démontre que les panneaux solaires jouent un rôle complémentaire, avec une contribution qui varie sensiblement selon la demande énergétique imposée par la traction.

b- 2^{ème} cas : pour un ensoleillement moyen variant de 580 W/m^2 à 700 W/m^2 .

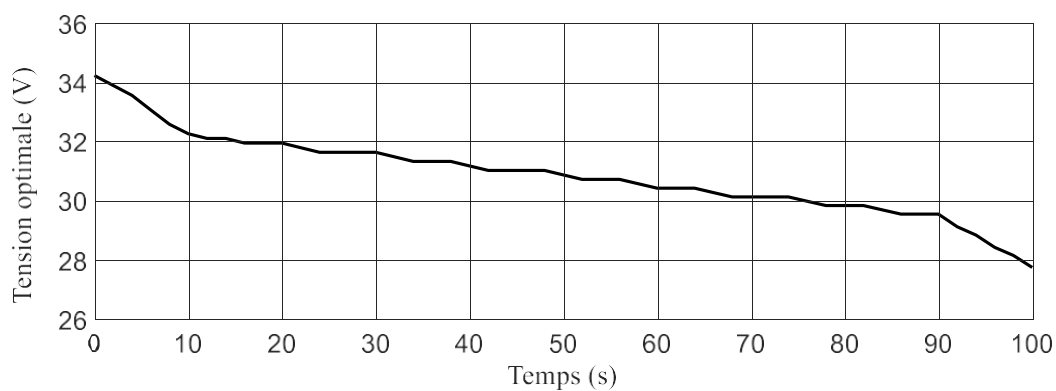


Figure III.30 Tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques

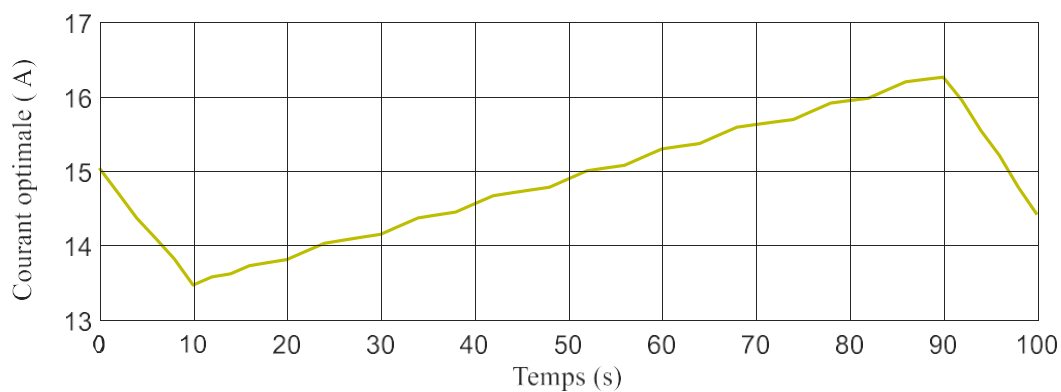


Figure III.31 Courant optimal délivré par les panneaux photovoltaïques

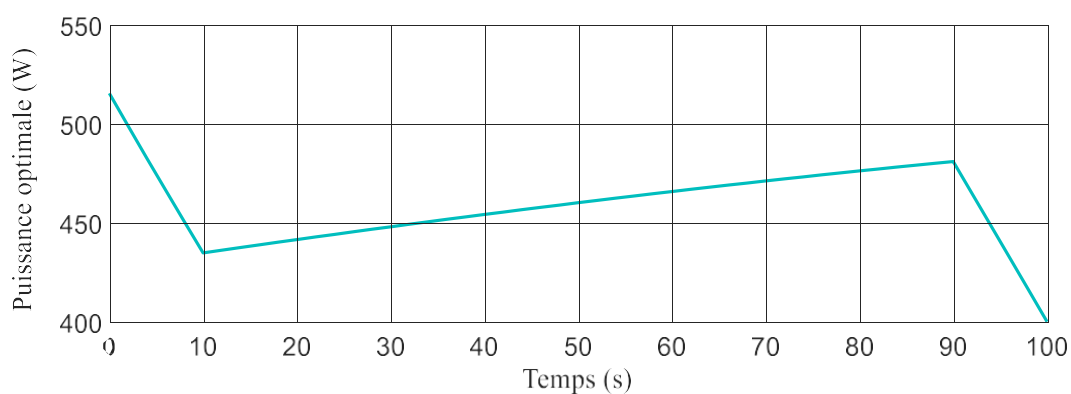


Figure III.32 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

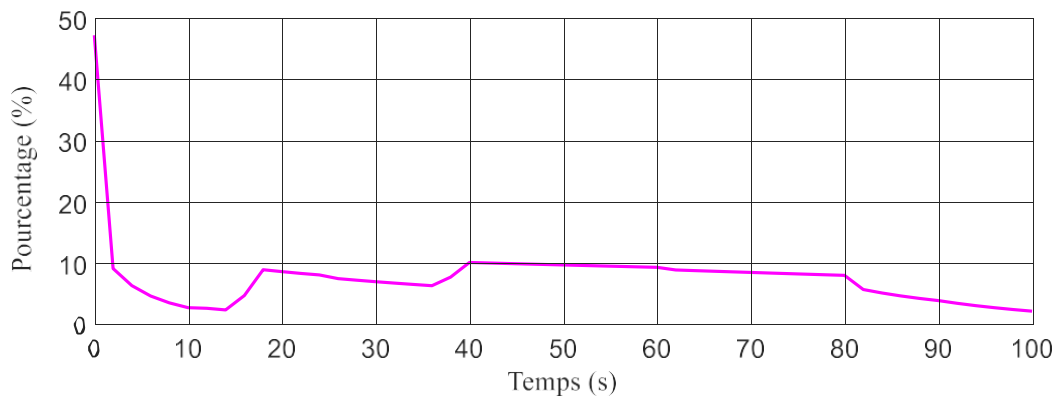


Figure III.33 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires :

- La figure III.30 illustre une décroissance progressive de la tension optimale, qui passe de 34 V à 27 V en 100 secondes. Cette réduction est liée à l'augmentation de la température des cellules photovoltaïques, un phénomène qui tend à abaisser la tension malgré une irradiation solaire satisfaisante ;
- Dans la figure III.31, on constate une montée progressive du courant optimal jusqu'à 90 secondes, suivie d'une chute rapide. Ce comportement est le résultat combiné d'une irradiation croissante et de la possible surchauffe des cellules, ou bien d'une diminution brusque de l'ensoleillement ;
- La figure III.32 présente la puissance optimale, qui montre d'abord une chute rapide, suivie d'une phase stable avec une légère montée jusqu'à 90 secondes, avant de connaître une forte baisse vers 390 W. Ce phénomène illustre la réaction dynamique aux conditions d'ensoleillement fluctuantes ;
- Le graphique de la figure III .33 illustre une forte contribution initiale des panneaux PV (près de 50%), chutant vite à un apport secondaire (5-10%) pour la traction électrique en cycle semi-urbain. L'étude confirme que les PV sont complémentaires, utiles pour les pics de puissance, mais insuffisants pour une traction continue, même sous fort ensoleillement et conditions variables.

c- 3^{ème} cas : pour un faible ensoleillement qui varie de 100 W/m^2 à 300 W/m^2 .

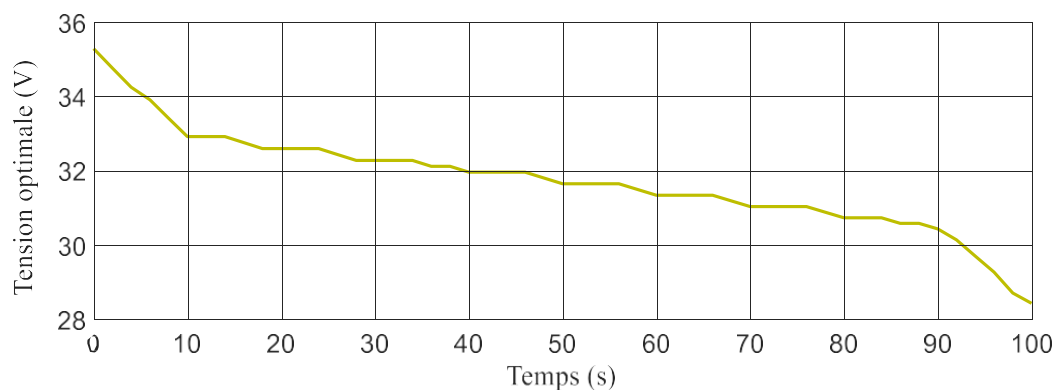


Figure III.34 Tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques

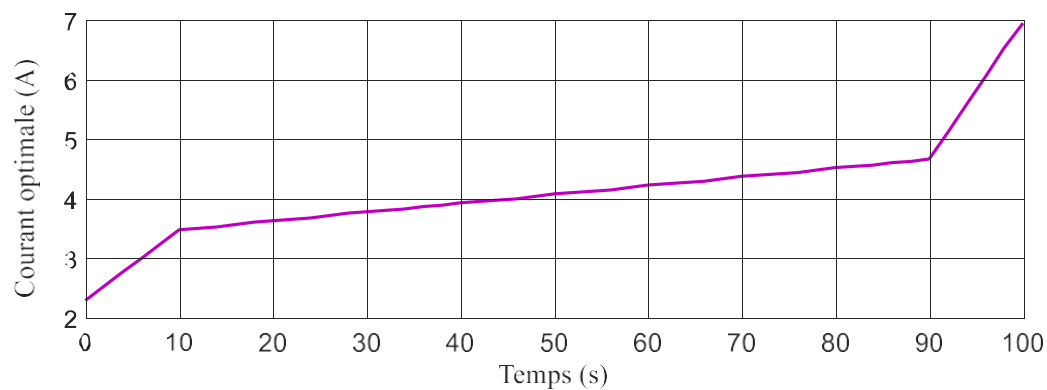


Figure III.35 Courant optimal délivré par les panneaux photovoltaïques

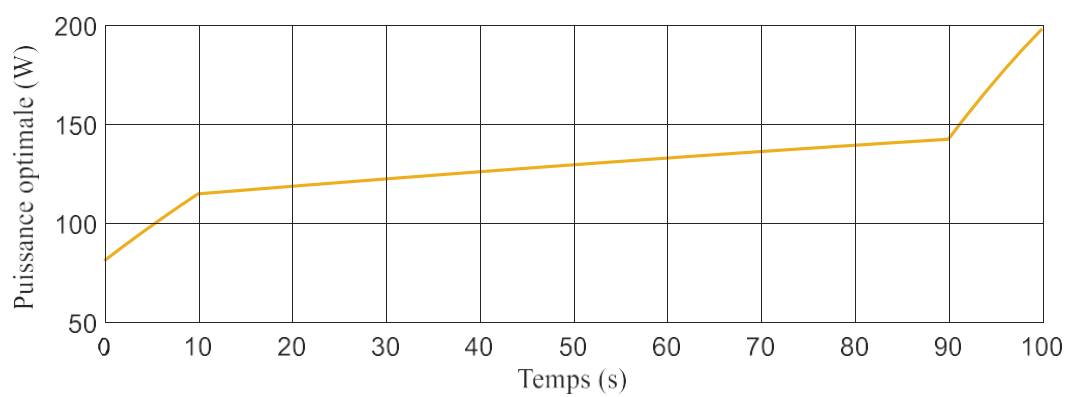


Figure III.36 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

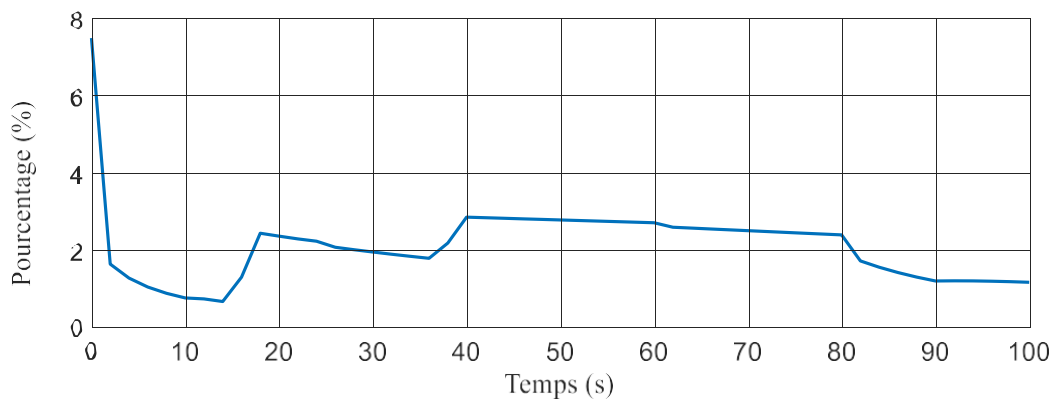


Figure III.37 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires :

- On observe dans la figure III.34 une diminution progressive de la tension optimale au fil du temps. Ce comportement suggère une relation inverse avec l'augmentation de l'ensoleillement, ce qui est caractéristique du fonctionnement d'un système photovoltaïque soumis à des températures croissantes ;
- La courbe présentée dans la figure III.35 met en évidence une hausse continue du courant optimal, directement corrélée à l'intensité lumineuse. Cela traduit le comportement attendu d'un générateur photovoltaïque, où le courant augmente proportionnellement à l'irradiation solaire ;
- Dans la figure III.36, on distingue une croissance progressive de la puissance optimale, évoluant d'environ 80 W au démarrage jusqu'à près de 190 W à 100 secondes. Cette évolution reflète l'influence directe de l'ensoleillement croissant et peut s'expliquer par l'effet combiné de la tension et du courant optimaux ;
- Cette figure met en évidence, dans la figure III.37, le taux de participation des panneaux photovoltaïques intégrés à la traction électrique. Celui-ci dépasse initialement 6 %, chute en dessous de 1 % en moins de 10 secondes, puis présente des fluctuations avec des pics atteignant 3 % autour de 20 s et à nouveau entre 40 et 50 s. Après cette phase, la contribution reste relativement stable entre 2 % et 3 %, avant de décroître vers 1,5 % à 100 secondes. Ce comportement pourrait être lié à une mesure d'efficacité ou à une erreur influencée par les conditions dynamiques du système.

III.2.1.3 Troisième étude : cycle routier

L'étude 3 porte sur le cycle routier pour une vitesse comprise entre 80Km/h et 120 Km/h, dans lequel :

- La température est variée de 248 .15 K à 318.15 K ;
- La vitesse de vent est variée de 0 km/h à 20 km/h ;
- La pente de la route est variée de 0 % ;

a – 1^{er} cas : Pour un l'ensoleillement important qui varie de 900 W/m^2 à 1000 W/m^2 .

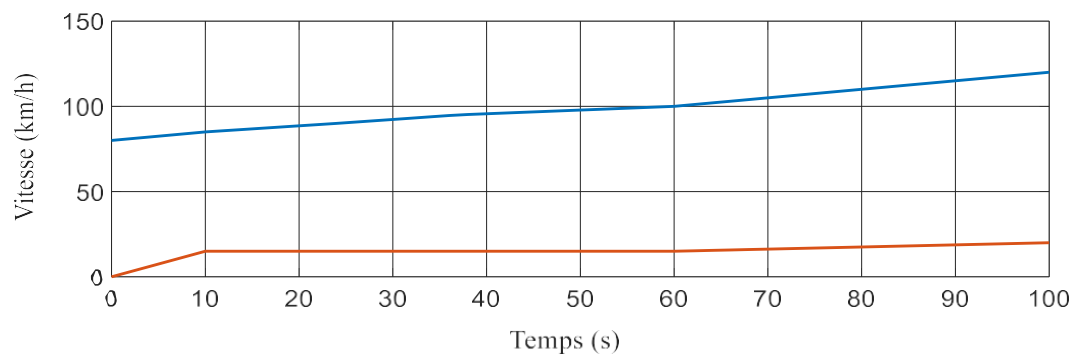


Figure III. 38 Profil de vitesse véhicule et vitesse du vent en fonction de temps

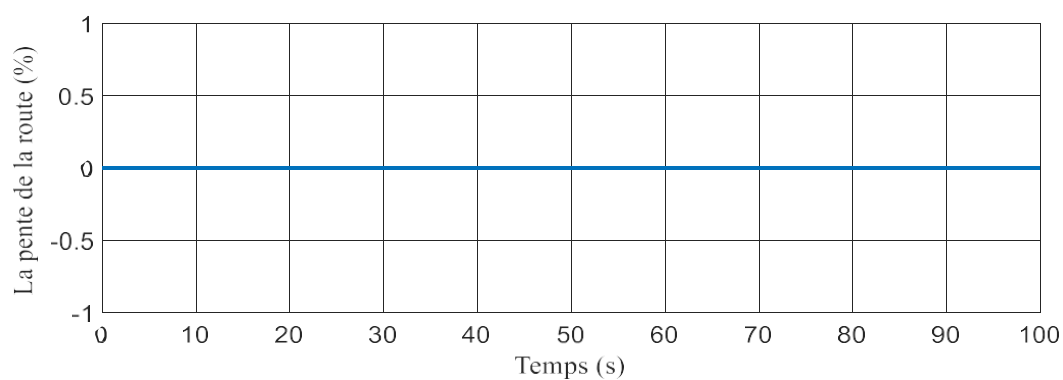


Figure III.39 Variation de pente de la route en fonction de temps

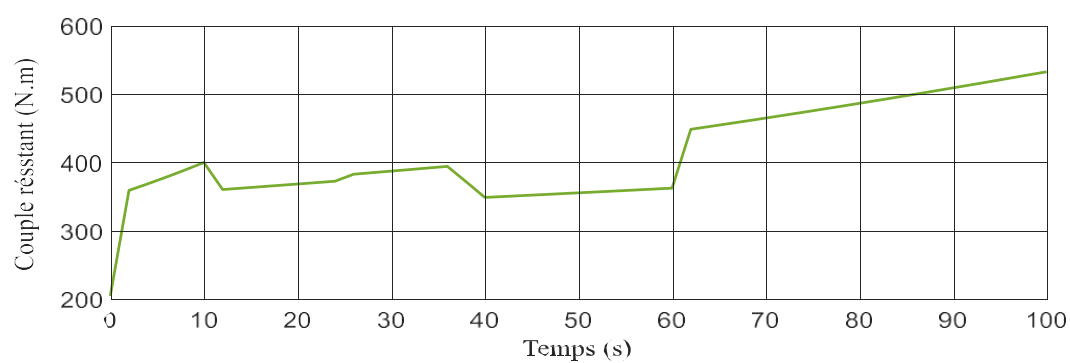


Figure III.40 Couple Figure développé par moteur en fonction de temps

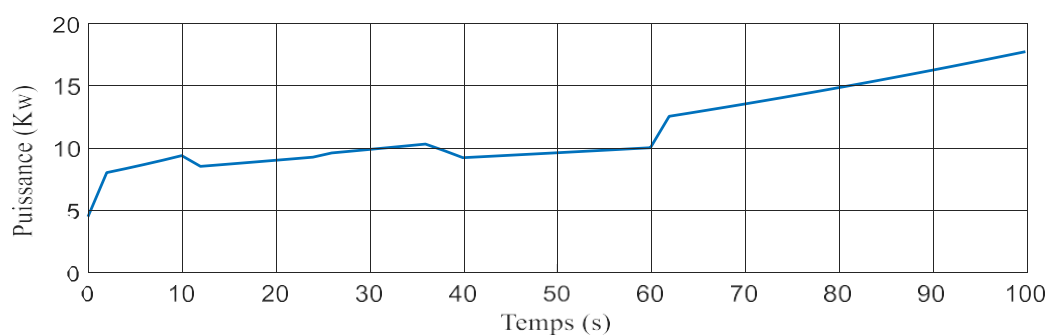


Figure III.41 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps

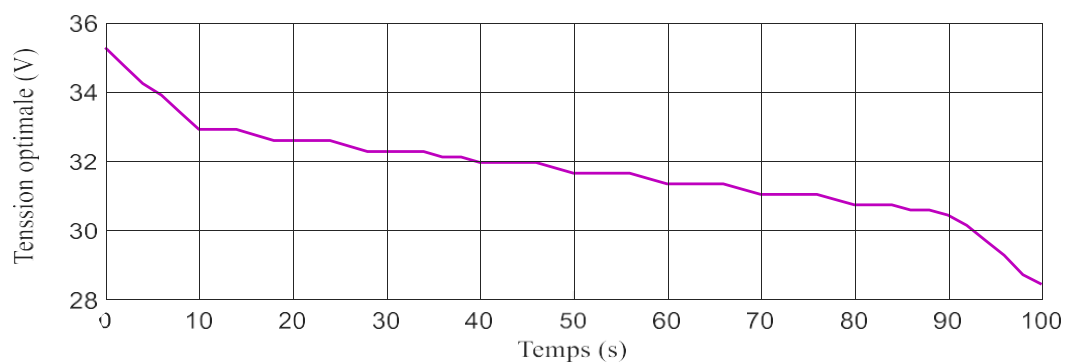


Figure III.42 Tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques

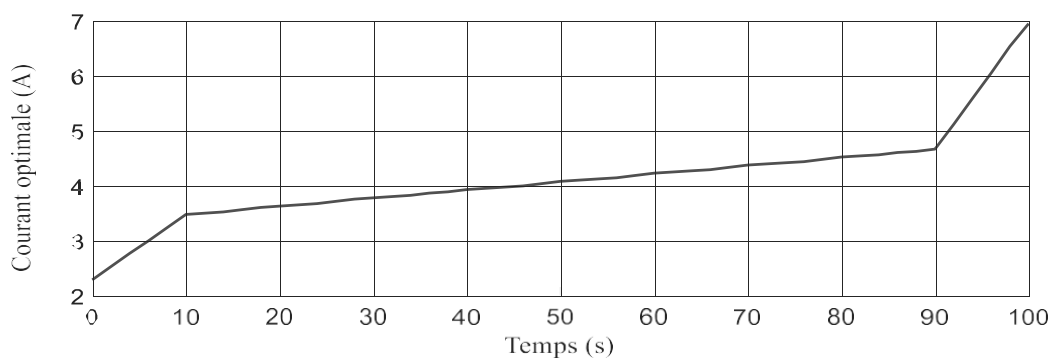


Figure III.43 Courant optimal délivré par les panneaux photovoltaïques

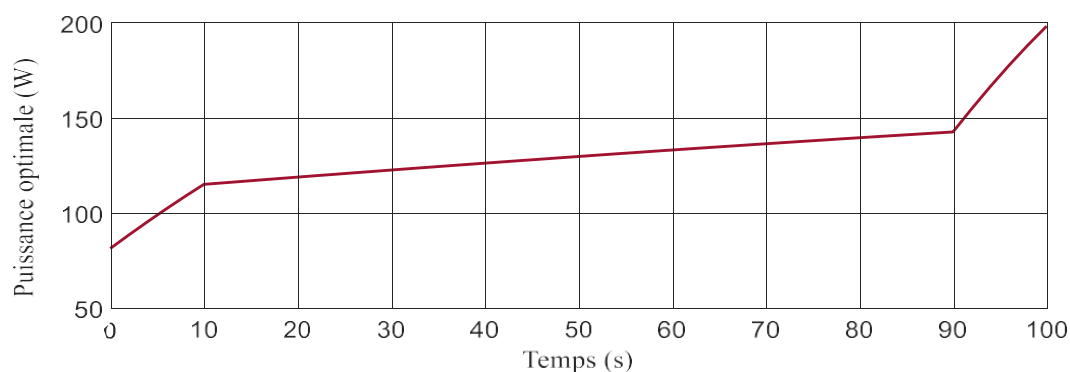


Figure III.44 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

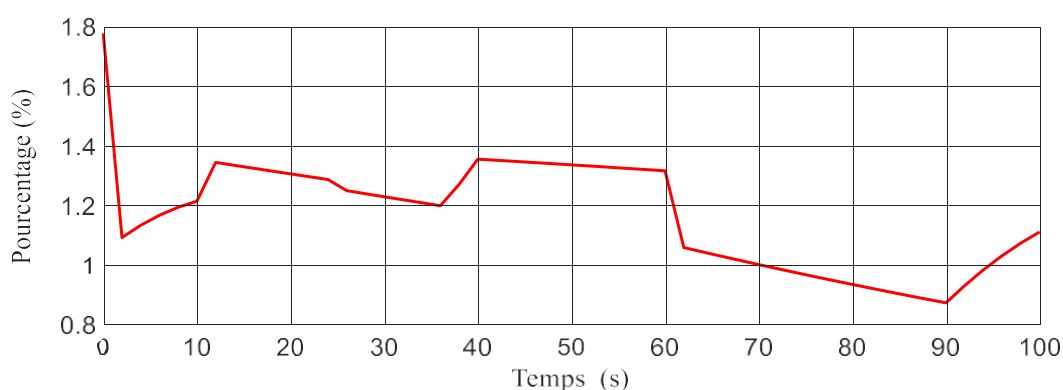


Figure III.45 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires :

- La courbe présentée dans la figure III.42 révèle une diminution graduelle de la tension optimale, passant de 36 V à environ 30 V. Ce comportement est typique du fonctionnement d'un système photovoltaïque, qui ajuste son point de fonctionnement en fonction des conditions d'irradiation et de température afin d'optimiser la puissance produite ;
- La figure III.43 montre une augmentation quasi linéaire du courant optimal, passant de 2 A à près de 6,8 A. Cette progression est en adéquation avec l'augmentation de l'irradiation solaire, permettant ainsi une montée continue de la puissance délivrée par les panneaux, de 70 W à environ 200 W ;
- La figure III.44 montre une augmentation progressive de la puissance délivrée par les panneaux, passant d'environ 80 W à près de 180 W. Cette progression suit l'augmentation de l'ensoleillement et du courant optimal, permettant une montée continue et significative de la puissance produite ;
- Enfin, dans la figure III.45, on remarque que malgré la hausse de production des panneaux photovoltaïques, leur contribution effective à la traction reste limitée. Le taux de couverture énergétique varie entre 0,8 % et 1,8 %, ce qui met en évidence la

nécessité d'une source d'énergie complémentaire ou d'un dispositif de stockage pour assurer les besoins du véhicule.

a- 2^{ème} cas : pour un ensoleillement moyen variant de 580 W/m^2 à 700 W/m^2 .

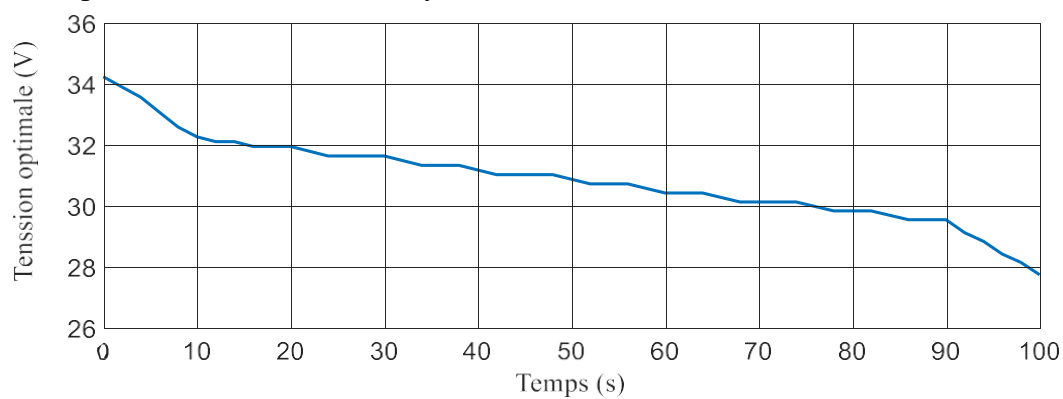


Figure III.46 Tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques

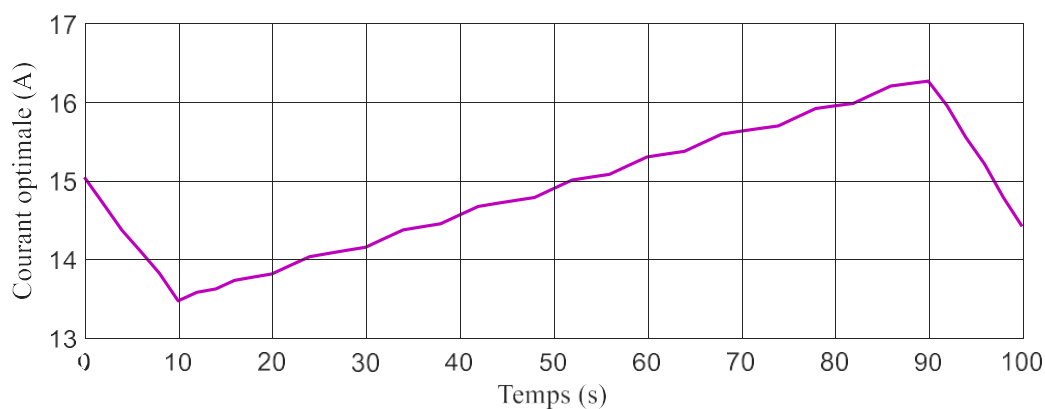


Figure III.47 Courant optimal délivrée par les panneaux photovoltaïques

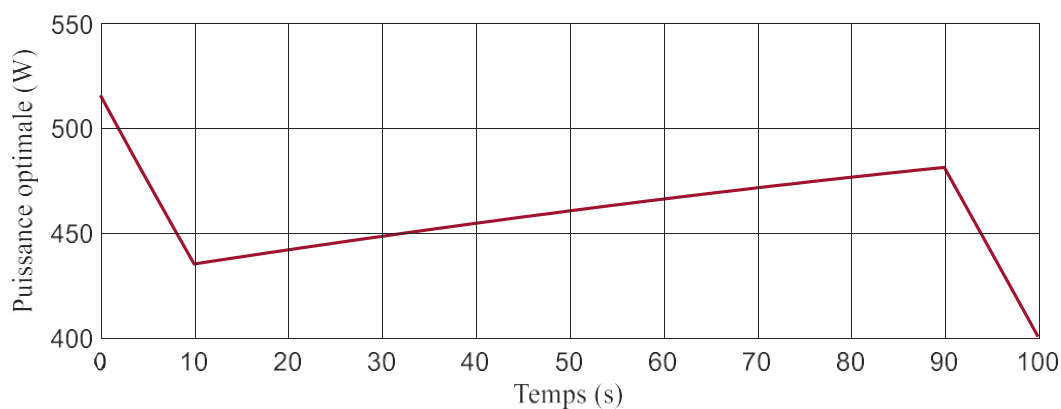


Figure III.48 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

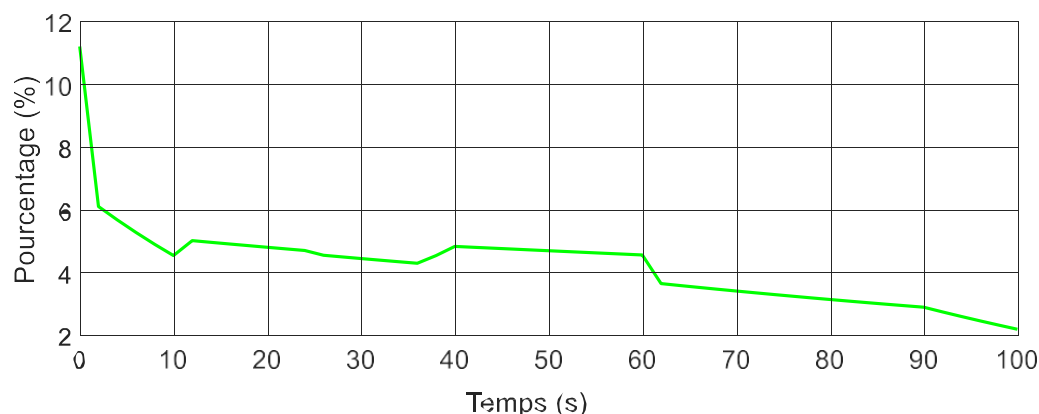


Figure III.49 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires:

- La Figure III.51 met en évidence une baisse progressive de la tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques, passant d'environ 34 V à 28 V durant la période simulée. Cette diminution traduit l'adaptation continue du système photovoltaïque en fonction des conditions de charge, de température et d'ensoleillement pour maximiser le rendement ;
- En se référant à la Figure III.52, la puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques suit la même tendance que l'ensoleillement, débutant à environ 510 W, chutant à 440 W vers 10 secondes, puis augmentant progressivement pour atteindre environ 470 W à 90 secondes avant de redescendre à 400 W en fin de période. Cela démontre la capacité du système à capter et à gérer de manière optimale l'énergie solaire incidente ;
- Selon la Figure III.53, le courant optimal délivré par les panneaux suit une évolution parallèle à celle de l'irradiation solaire. Il commence à 15 A, atteint un minimum de 13.5 A vers 10 secondes, puis augmente progressivement pour atteindre un maximum de 16 A vers 90 secondes, avant de baisser à 14 A. Cette synchronisation illustre la réactivité du système à l'énergie solaire disponible pour optimiser le courant de charge ;
- La Figure III.54 montre que le taux de contribution des panneaux photovoltaïques à la puissance nécessaire pour la traction électrique est significativement plus élevé que dans le cas précédent. Il débute à environ 11%, diminue à 4% vers 10 secondes, se stabilise autour de 4-5% pendant une période, puis diminue progressivement pour atteindre environ 2% à 100 secondes. Bien que cette contribution soit améliorée par rapport au cas d'ensoleillement faible, elle reste insuffisante pour une autonomie complète, soulignant le rôle complémentaire des panneaux dans un système de traction électrique.

III.2.2 Véhicule en stationnement

Dans ce cas en supposant que le véhicule est stationné pour être chargé à partir des panneaux solaires installés sur le toit d'une bâtisse pour charger ses batteries.

Pour la simulation de notre système avec batteries, on prend des profils réels pour l'ensoleillement et la température de la journée du 29 juin 2024 à Ouargla. Dans toutes les figures suivantes l'instant $t=0$ corresponde au début de la journée 8 h de matin.

- l'ensoleillement varie de 400 W/m^2 à 950 W/m^2 ;
- La température est variée de 308.15 K à 320 K .

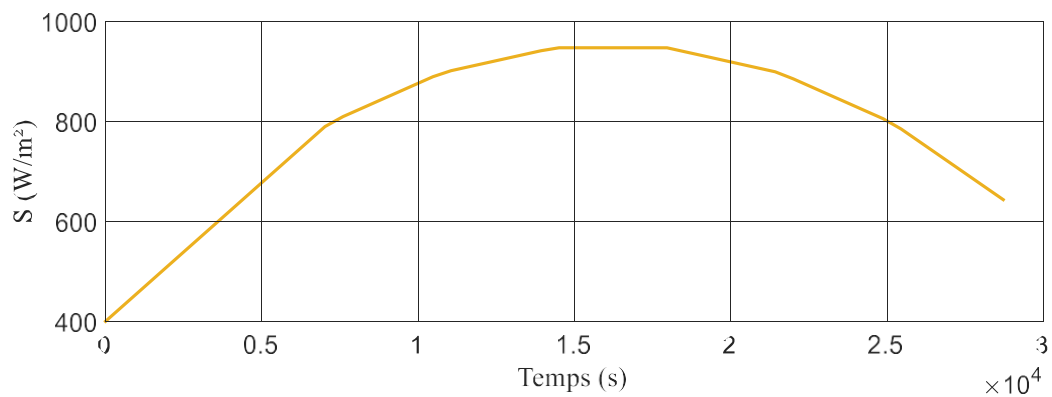


Figure III.50 Variation de l'ensoleillement en fonction du temps

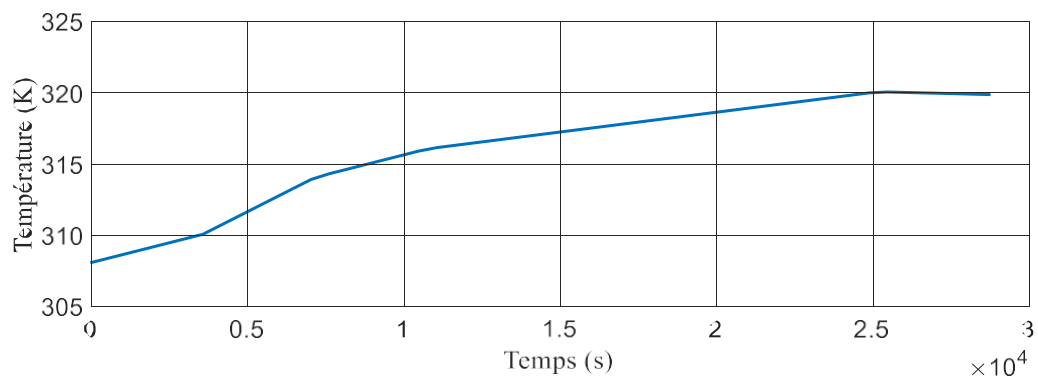


Figure III.51 Variation de la température en fonction du temps

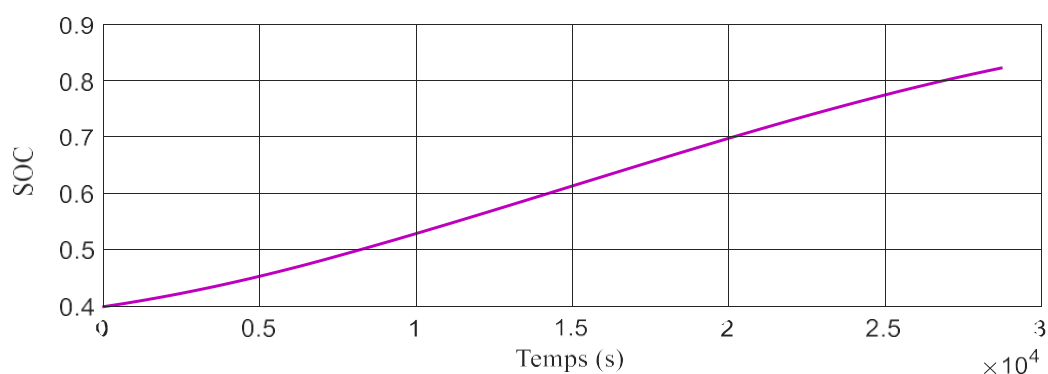


Figure III.52 Etat de chargement de groupe de batteries en fonctionne de temps

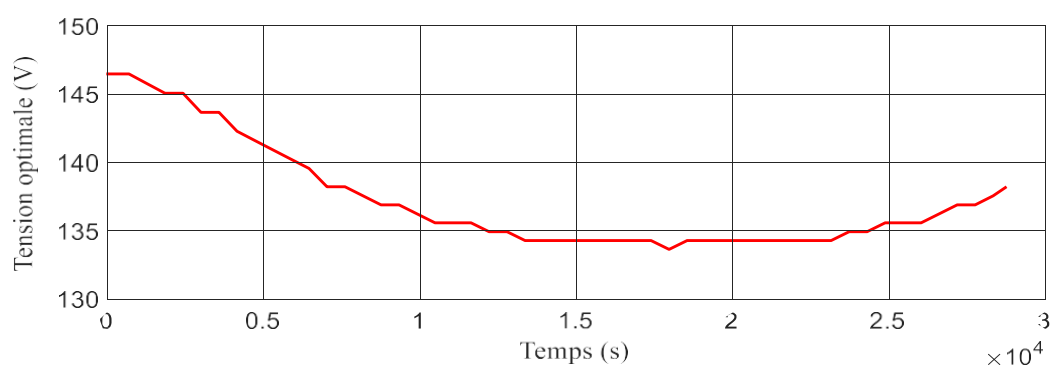


Figure III.53 Tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques

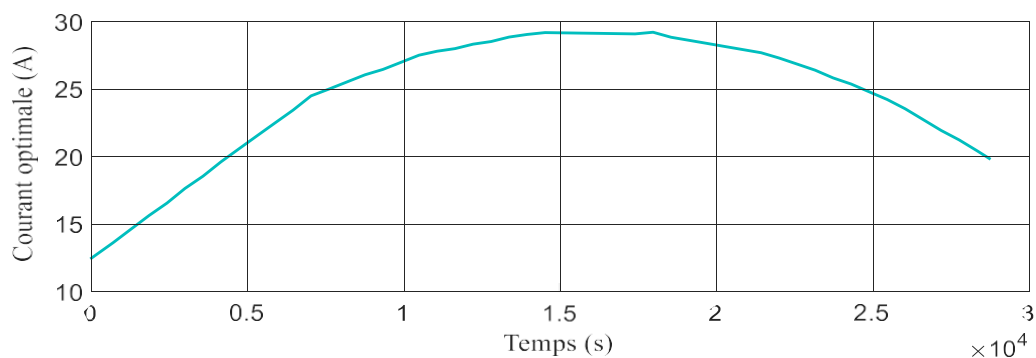


Figure III.54 Courant optimal délivré par les panneaux photovoltaïques

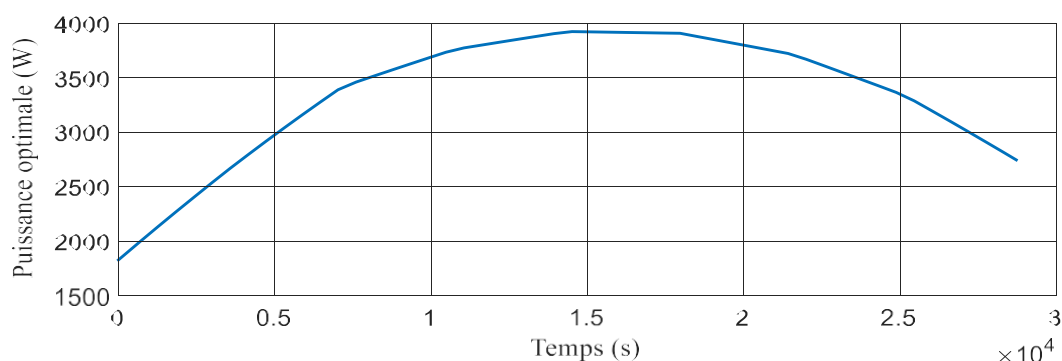


Figure III.55 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

Commentaires :

- À partir de la Figure III.50, on observe l'évolution de l'irradiation solaire au cours de la journée du 29 juin 2024 à Ouargla. L'ensoleillement commence à un niveau modéré d'environ 400 W/m^2 , atteint un pic de 950 W/m^2 vers le milieu de la journée, puis décroît progressivement, suivant un cycle solaire typique ;
- La Figure III.51 met en évidence une hausse progressive de la température ambiante, passant de $308,15 \text{ K}$ à 320 K durant la période simulée. Cette élévation thermique, étroitement liée à l'intensité du rayonnement solaire et aux conditions environnementales locales, constitue un facteur déterminant influençant les performances globales et la longévité de la batterie ;
- En se référant à la Figure III.52, l'état de charge (SOC) de la batterie montre une augmentation quasi linéaire allant de $0,4$ à $0,9$, indiquant un processus de recharge efficace et constant, directement alimenté par l'énergie solaire disponible tout au long de la journée ;
- D'après la Figure III.53, la tension optimale appliquée par les panneaux photovoltaïques à la batterie varie de manière dynamique. Elle décroît d'abord de 145 V à 133 V , puis remonte légèrement vers 138 V . Cette variation traduit l'adaptation continue du système photovoltaïque en fonction des conditions de charge, de température et du courant ;
- Selon la figure III.54, le courant optimal délivré par les panneaux suit une évolution parallèle à celle de l'irradiation solaire. Il commence à $12\text{-}13 \text{ A}$, atteint un maximum de $29\text{-}30 \text{ A}$, avant de baisser à $20\text{-}22 \text{ A}$ en fin de journée. Cette synchronisation illustre la réactivité du système à l'énergie solaire disponible pour optimiser le courant de charge ;
- Enfin, la Figure III.55 montre que la puissance électrique extraite des panneaux suit la même tendance : elle débute à environ $1900\text{-}2000 \text{ W}$, atteint un pic avoisinant les 3900 W , puis diminue progressivement. Ce comportement démontre la capacité du système à capter et à gérer de manière optimale l'énergie solaire incidente, en maximisant la puissance transférée vers la batterie pendant les périodes de fort ensoleillement.

III.2.3 Véhicule en route avec l'énergie stockée dans les batteries

Cette étude porte sur le comportement d'un véhicule électrique équipé d'une batterie, évalué selon trois types de cycles de conduite : urbain, semi-urbain et routier. dans lequel :

- La température est variée de 283.40 K à 284.25° K ;
- l'ensoleillement varie de 610 W/m² à 644 W/m² ;
- La vitesse de vent est variée de 0 km/h à 20 km/h .

a- **1^{ère} cas** : Pour un cycle urbain où la vitesse de véhicule est variable de 0 km/h à 45 km/h . Par contre la pente de la route varie de 0 % à 15 %.

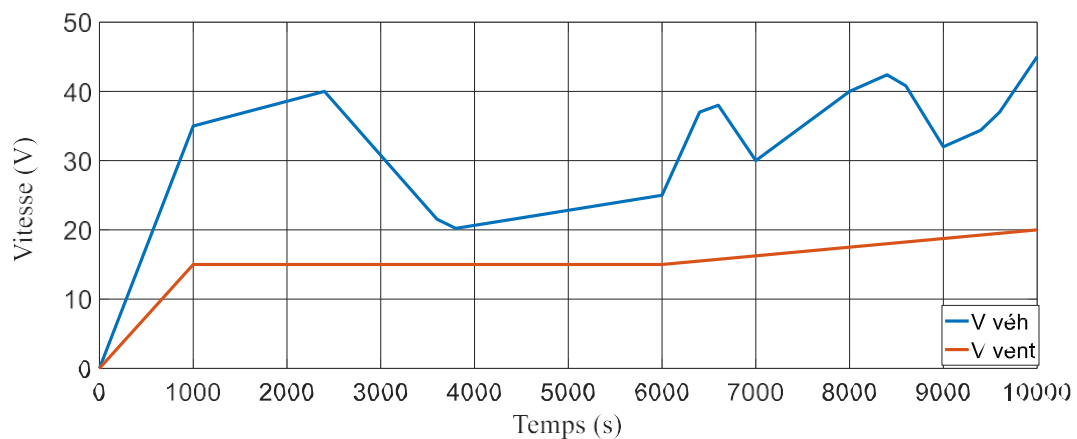


Figure III.56 Profils de vitesse de véhicule et de vitesse de vent en fonction du temps

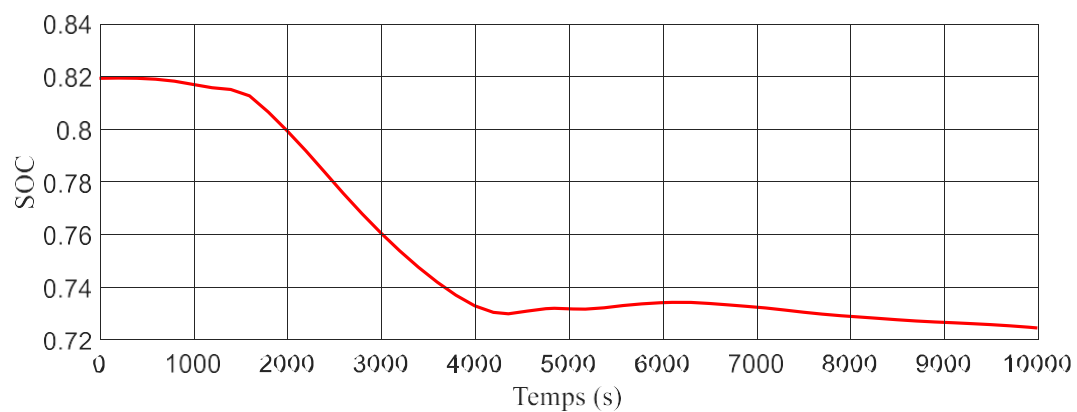


Figure III. 57 Etat de charge des batteries de véhicule en fonction du temps

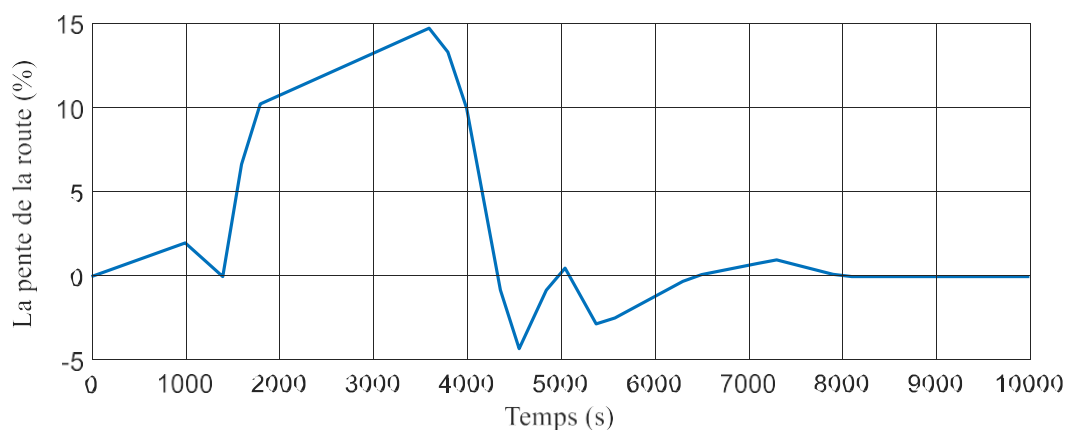


Figure III.58 La pente de la route en fonction de temps

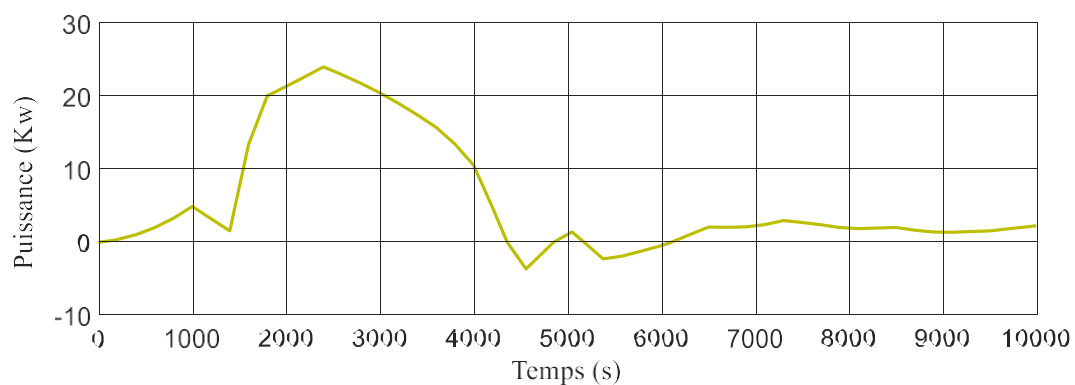


Figure III.59 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps

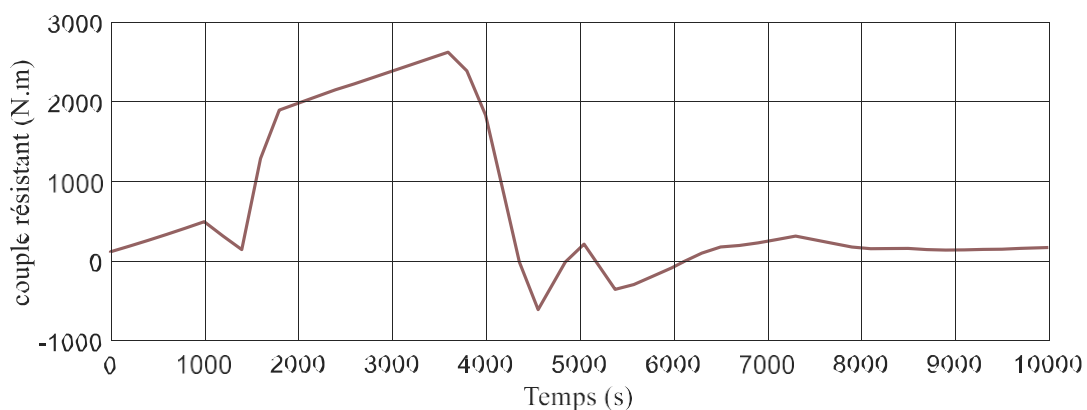


Figure III.60 Couple développé par moteur en fonction de temps

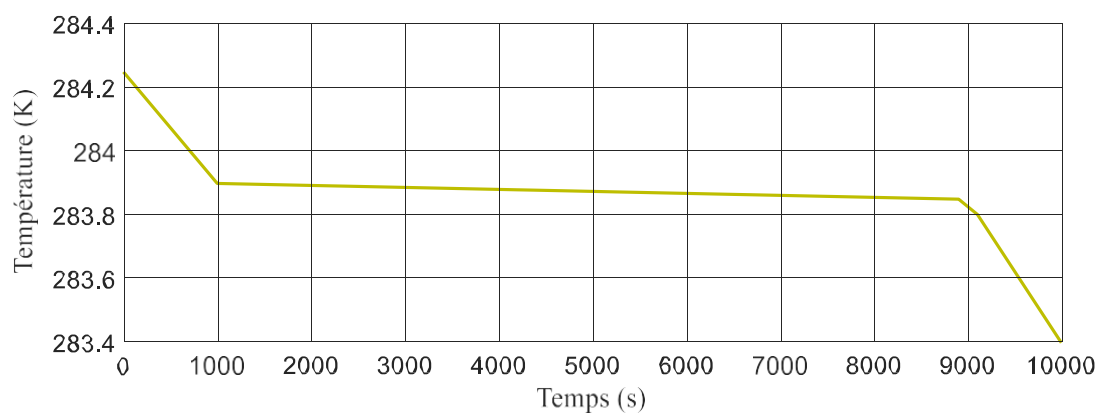


Figure III. 61 Variations de la température en fonction de temps

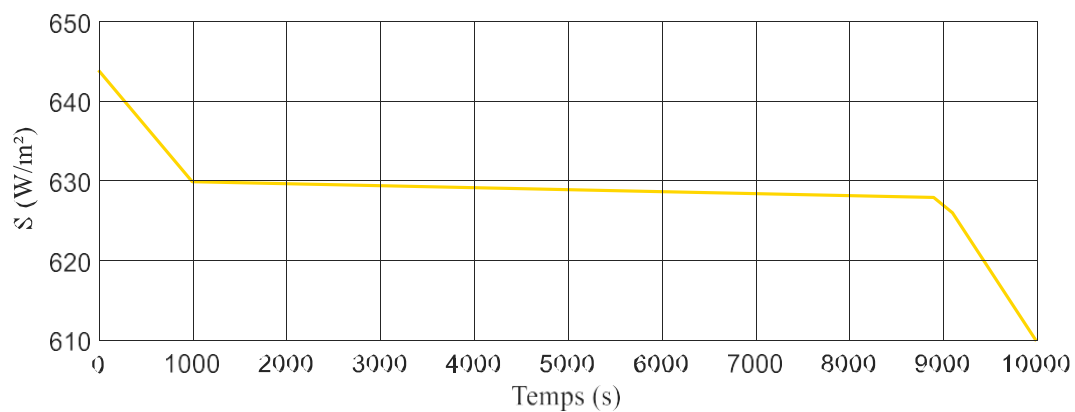


Figure III.62 Variations de l'ensoleillement en fonction de temps

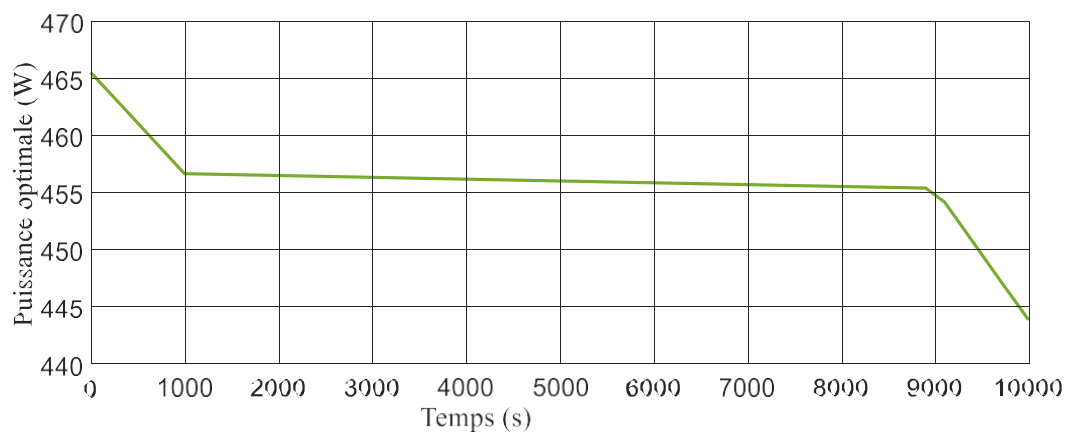


Figure III.63 Puissance optimale délivrée par les panneaux photovoltaïques

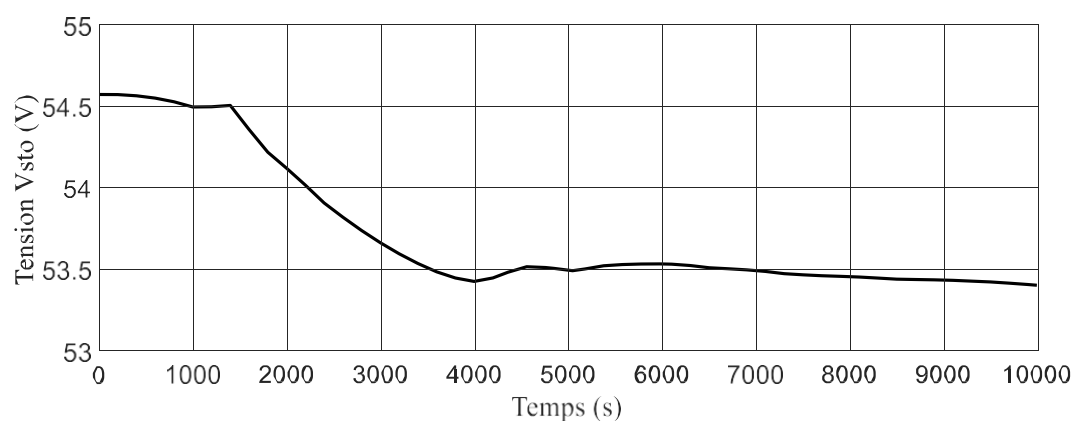


Figure III.64 Tension appliquée aux bornes des batteries de véhicule en fonction de temps

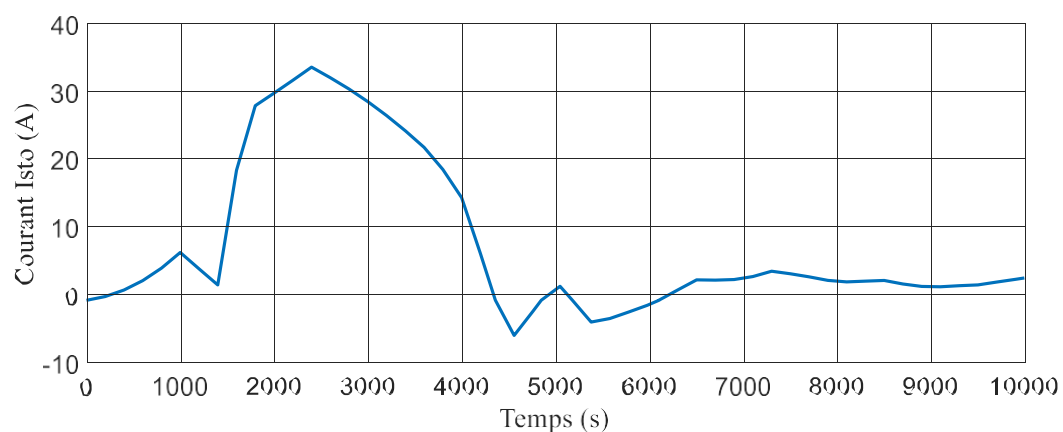


Figure III.65 Courant fourni /absorbé par la batterie en fonction de temps

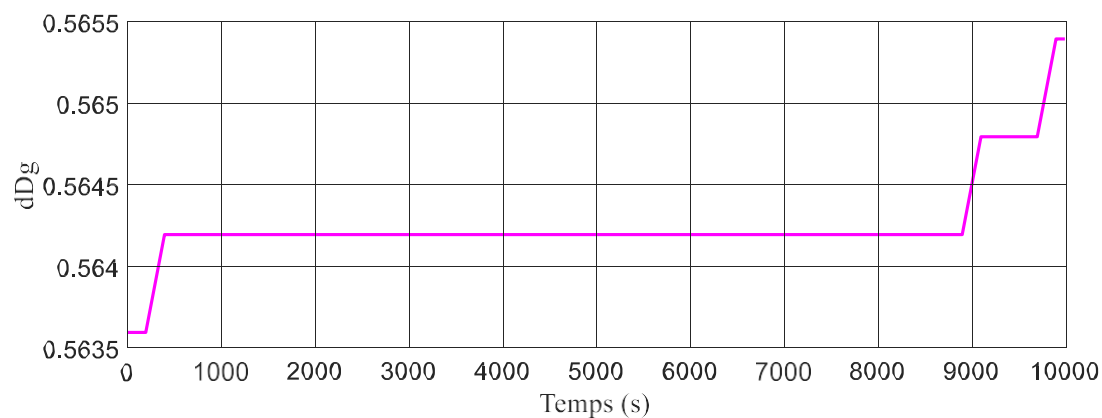


Figure III.66 Evolution du signal dDg (rapport cyclique appliquée par la commande MPPT) en fonction de temps

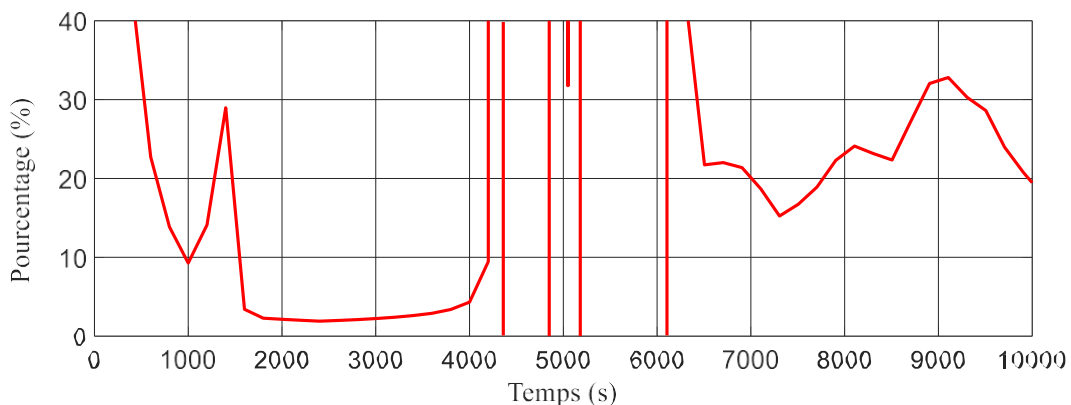


Figure III.67 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires :

- Figure III.56 représente la vitesse de véhicule et la vitesse de vent en fonction de temps sur une durée de 10 000 secondes. On propose un cycle de conduite urbain typique pour le véhicule, avec des phases d'accélération, de vitesse constante et de décélération, atteignant des pics autour de 40 km/h. La vitesse du vent reste relativement stable et faible, autour de 10-15 km/h, agissant comme une résistance aérodynamique constante mais mineure ;
- Selon les données de la Figure III.57, l'état de charge (SOC) de la batterie montre une tendance décroissante au fil du temps. Le SOC, initialement situé autour de 83–84 %, chute progressivement jusqu'à environ 73 % au bout de 4000 secondes, avant de se stabiliser. Cette baisse traduit la consommation d'énergie du système de propulsion, en particulier pendant les phases dynamiques du cycle ;
- Comme le montre la figure III.58, le profil de la pente de la route varie notablement tout au long du cycle. Une pente ascendante significative, atteignant jusqu'à 15 %, apparaît entre 2000 et 4000 secondes, ce qui sollicite fortement le moteur. En revanche, une pente descendante marquée, observée entre 4500 et 5000 secondes, favorise une éventuelle récupération d'énergie. Ces variations topographiques influencent directement les besoins énergétiques du véhicule ;
- A travers la figure III.59, on observe que la puissance de traction électrique varie fortement durant le cycle urbain. Des pics supérieurs à 20 kW apparaissent lors des phases d'accélération et de montée, tandis que la puissance chute ou devient nulle lors des arrêts et décélérations. Des valeurs négatives traduisent la récupération d'énergie par freinage régénératif. Ces variations montrent l'importance d'un système de gestion énergétique optimisé pour améliorer l'autonomie et la consommation de la batterie en milieu urbain ;
- L'analyse de la Figure III.60 révèle un comportement complexe du couple résistant au cours du temps. Après un démarrage autour de 200 N.m, le couple augmente de manière marquée, culminant à environ 2500 N.m vers 3500 secondes, ce qui

correspond à un effort intense du moteur. Ensuite, une chute soudaine jusqu'à -500 N.m est observée vers 4500 secondes, traduisant un freinage ou une descente. Le couple retrouve une valeur stable d'environ 200 N.m après 6000 secondes ;

- Il ressort de la Figure III.61 que la température ambiante subit une légère baisse en début de cycle, puis se stabilise autour de 283,8 K, avant de diminuer à nouveau vers la fin. Bien que ces variations soient peu marquées, elles demeurent significatives, car la température influence directement les performances de la batterie ainsi que l'efficacité thermique des composants électroniques du véhicule ;
- D'après les courbes présentées dans la Figure III.63, la puissance issue ou injectée par le système de stockage d'énergie suit une tendance décroissante tout au long du cycle. Cela reflète une réponse adaptative du système aux besoins énergétiques du véhicule, en tenant compte des pertes internes. Cette courbe donne une idée claire de la manière dont la batterie soutient l'ensemble du système en fonction des sollicitations dynamiques du profil de conduite ;
- À partir de la Figure III.64, on remarque que la tension de la batterie diminue progressivement durant la première phase du cycle de conduite, avant d'atteindre une forme de stabilité cela reflète une sollicitation énergétique importante en début de parcours – notamment lors des démarrages fréquents – suivie par une phase plus régulière, où la consommation devient plus modérée ;
- En ce qui concerne la Figure III.65, elle met en évidence les variations du courant fourni par la batterie, avec un pic important autour de 3000 secondes, suivi par une chute rapide, allant même jusqu'à des valeurs négatives. Ce comportement met en lumière les périodes d'accélération (grande consommation), suivies de phases de faible demande ou de récupération d'énergie, comme lors du freinage régénératif ;
- On remarque, à travers la Figure III.66, le comportement du rapport cyclique utilisé dans la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ce signal de commande reste stable dans l'ensemble, avec de légères variations qui traduisent des ajustements fins visant à suivre le point de puissance maximale. La stabilité de ce signal confirme la présence d'un dispositif de suivi MPPT, probablement associé à des panneaux photovoltaïques intégrés au véhicule, ce qui permet d'optimiser l'exploitation de l'énergie solaire et d'améliorer l'efficacité de la recharge ;
- Enfin, la Figure III.67 montre que la contribution des panneaux photovoltaïques est très fluctuante, atteignant des pics de plus de 30% lorsque la demande de puissance est faible, mais quasi nulle lors des sollicitations intenses, ce qui confirme leur rôle d'appoint et non de source principale d'énergie. Ces figures sont donc essentielles pour illustrer la dynamique énergétique du système, et l'intérêt stratégique d'une telle intégration solaire dans les phases peu exigeantes du cycle urbain.

b- 2^{ème} cas : Cycle semi urbain et la vitesse de véhicule est variable de 30 km/h à 80 km/h . Par contre la pente de la route varie de 0 % à 10 %.

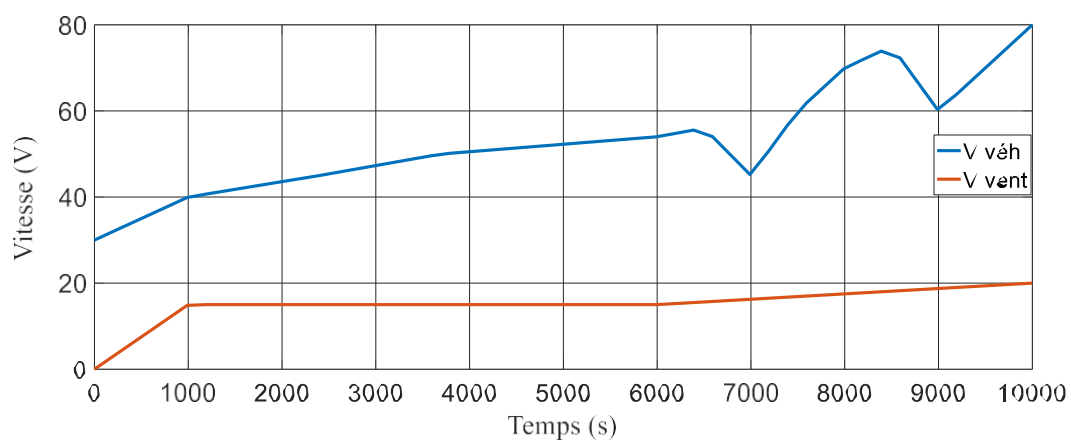


Figure III.68 Profils des vitesses de véhicule et de vent en fonction de temps

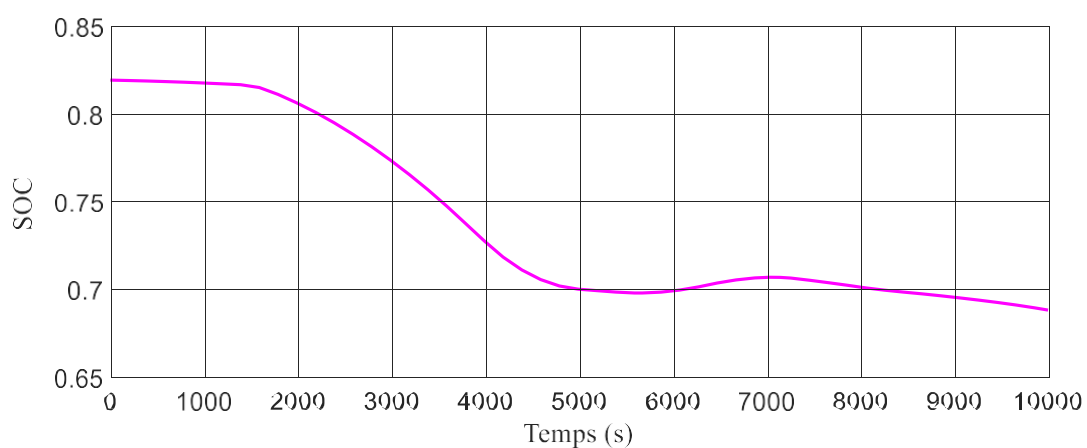


Figure III.69 Etat de chargement de groupe de batteries en fonction de temps

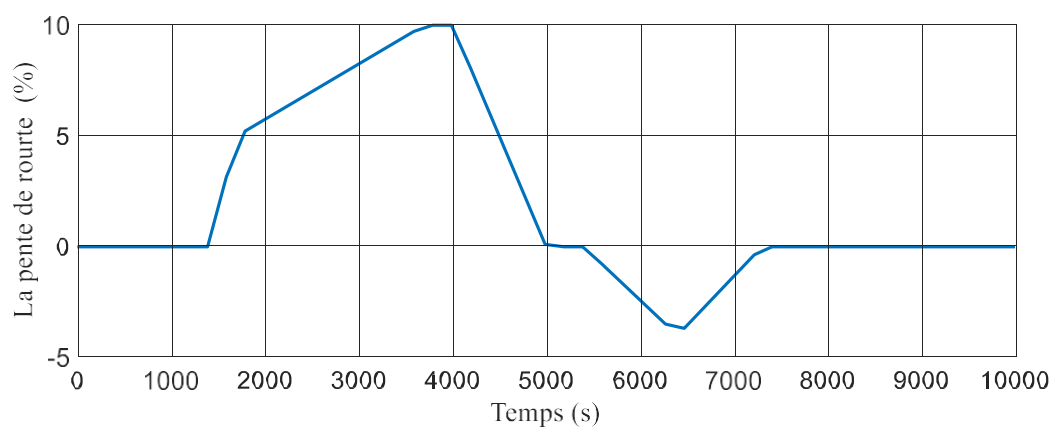


Figure III.70 La pente de la route en fonction de temps

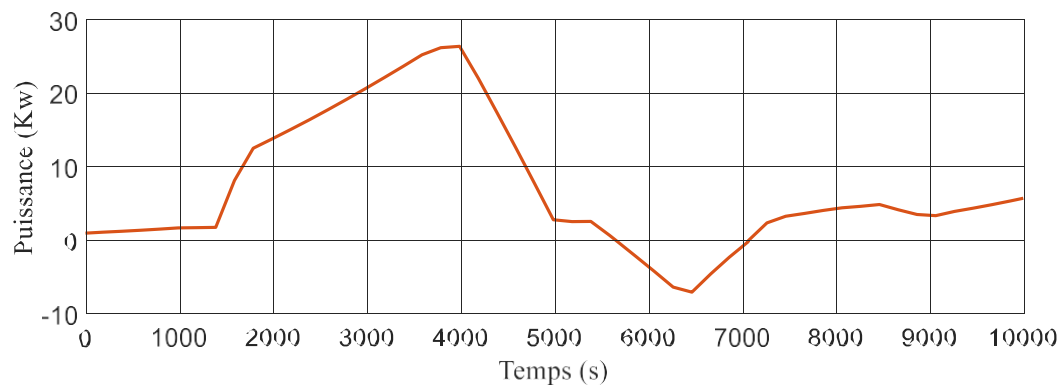


Figure III.71 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps

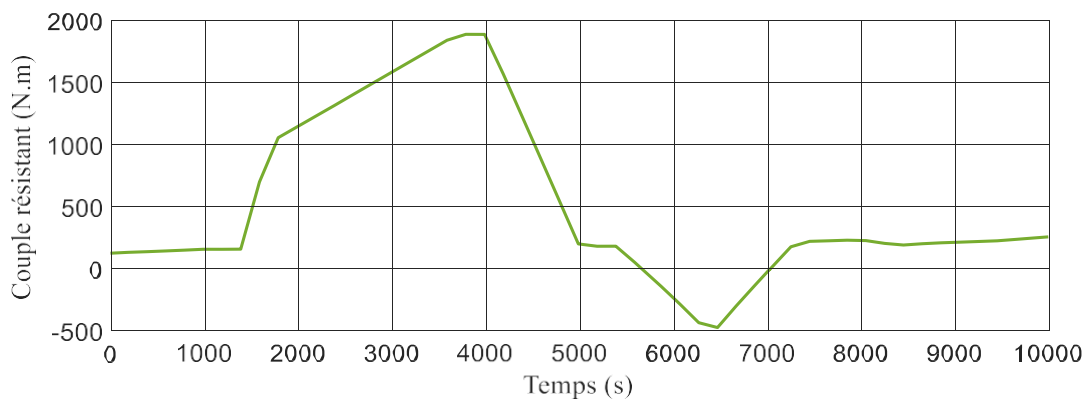


Figure III.72 Couple développé par moteur en fonction de temps

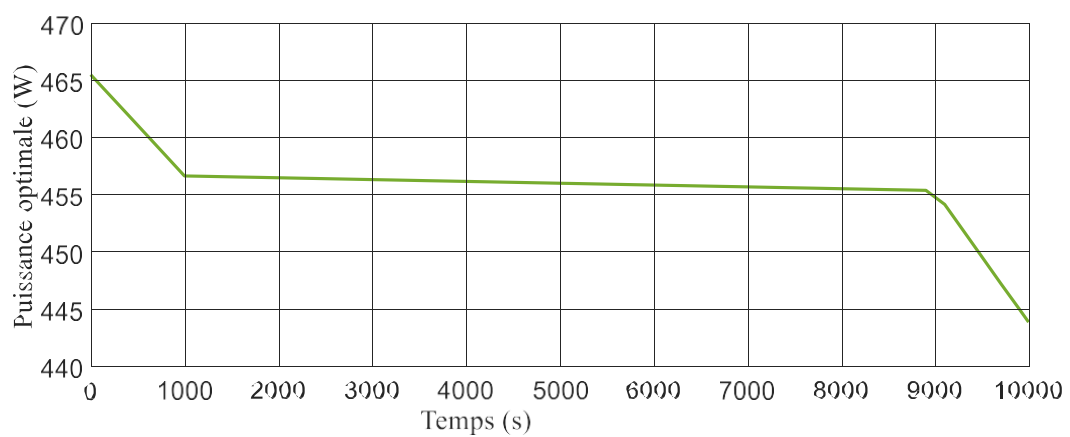


Figure III. 73 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

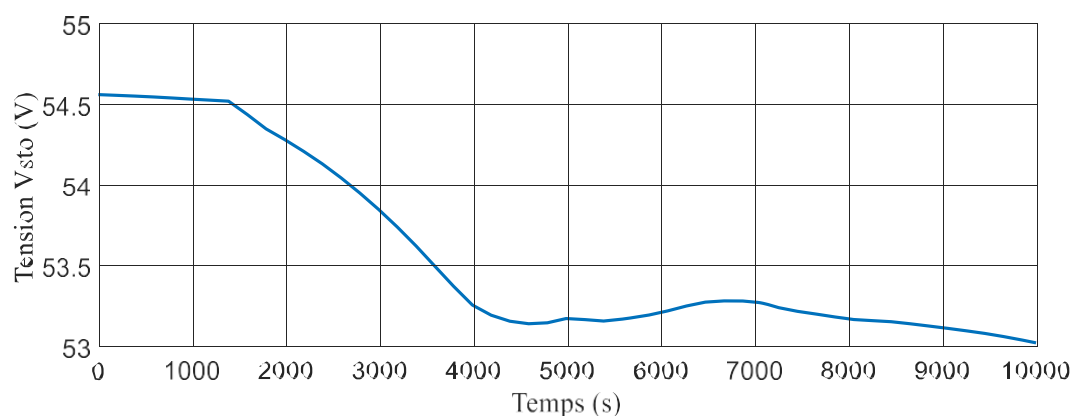


Figure III.74 Tension appliquée aux bornes des batteries de véhicule en fonction de temps

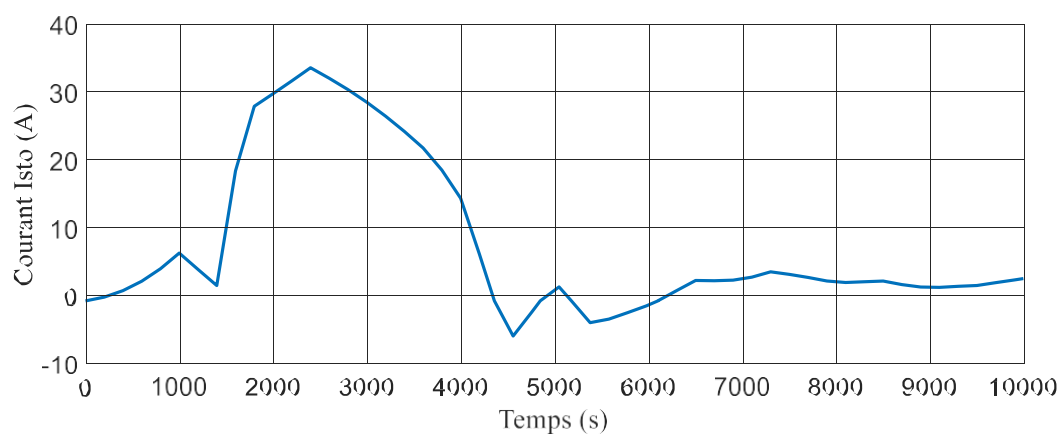


Figure III.75 Courant fourni /absorbé par la batterie en fonction de temps

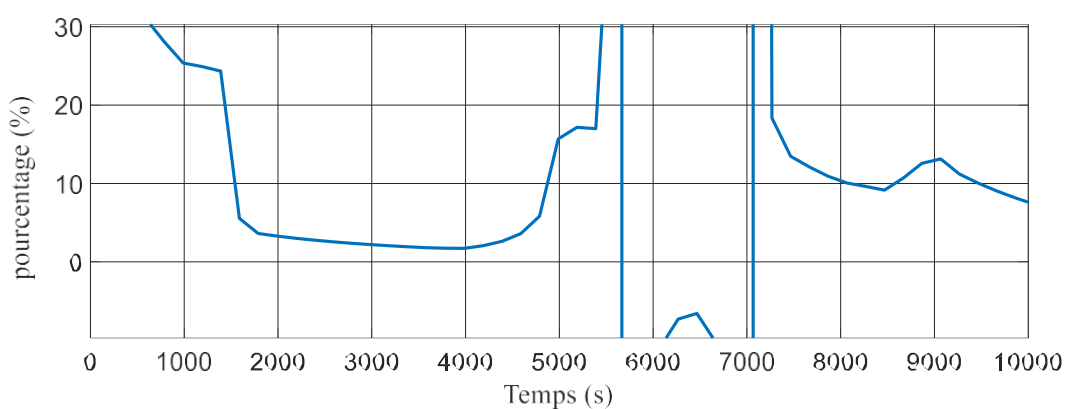


Figure III.76 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires :

- Cette (Figure III.68) met en évidence l'évolution simultanée de la vitesse du véhicule (ligne bleue) et de celle du vent (ligne rouge) durant un cycle semi-urbain. La vitesse du véhicule atteint des pics allant jusqu'à 80 km/h, ce qui traduit un profil de conduite plus rapide et plus exigeant que le cycle urbain. Quant à la vitesse du vent, elle est légèrement plus élevée, renforçant la résistance aérodynamique ;
- On remarque dans la figure III.69 une diminution plus marquée de l'état de charge (SOC) de la batterie (ligne violette) par rapport au cycle urbain. Le SOC passe d'environ 82–83 % à près de 68–69 % sur la durée du cycle. Cette perte rapide d'énergie reflète les sollicitations plus importantes du véhicule, liées à des vitesses plus élevées et une puissance demandée plus importante ;
- La courbe représentée dans la figure III.70 illustre les variations de la pente de la route, oscillant entre 0 % et un maximum de 10 % en montée. Une légère pente négative (~ -2 %) est observée vers le milieu du cycle. Bien que ces pentes soient moins abruptes que celles du cycle urbain, elles influencent néanmoins la puissance requise par le véhicule ;
- Ici, on observe dans la figure III.71 que la puissance utile (ligne verte) atteint un pic d'environ 30 kW, ce qui dépasse largement les valeurs enregistrées en milieu urbain. Cela s'explique par des vitesses plus élevées et des phases de forte accélération. On note également des valeurs négatives (~ -5 kW), caractéristiques des phases de récupération d'énergie lors du freinage régénératif ou des descentes ;
- La figure III.72 met en lumière le comportement du couple résistant (ligne verte), qui évolue de manière synchronisée avec la puissance utile. Un pic d'environ 1700 N.m est observé lors des fortes demandes énergétiques, tandis que des valeurs négatives proches de -300 N.m apparaissent pendant les phases de décélération, traduisant la capacité du véhicule à exploiter les forces de résistance pour récupérer de l'énergie ;
- On constate dans la figure III.73 que la puissance optimale (ligne verte) débute autour de 465–467 W, puis diminue lentement pour atteindre environ 442–445 W vers la fin du cycle. Cette puissance reste systématiquement supérieure à la puissance utile instantanée, ce qui suggère qu'elle intègre les consommations auxiliaires et les pertes du système (batterie, convertisseur), comme cela avait également été observé pour le cycle urbain ;
- À partir de cette (Figure III.74), on observe que la tension de la batterie diminue globalement de 54.5V à environ 53V sur la durée du cycle, signe de sa décharge progressive ;
- Cette (Figure III.75) met en évidence les pics de courant élevés (jusqu'à plus de 30A) nécessaires à la traction, alternant avec des phases de faible consommation ou de courant négatif (régénération) ;
- Il est clair, à partir de cette (Figure III.76), que la contribution des panneaux photovoltaïques est intermittente et majoritairement complémentaire (souvent inférieure à 15%), devenant négligeable lors des pics de puissance de traction.

- c- 3^{ème} cas : Cycle routier et la vitesse de véhicule est variable de 80 km/h à 120 km/h .
Par contre, dans ce cas en supposant que la pente de la route est nulle.

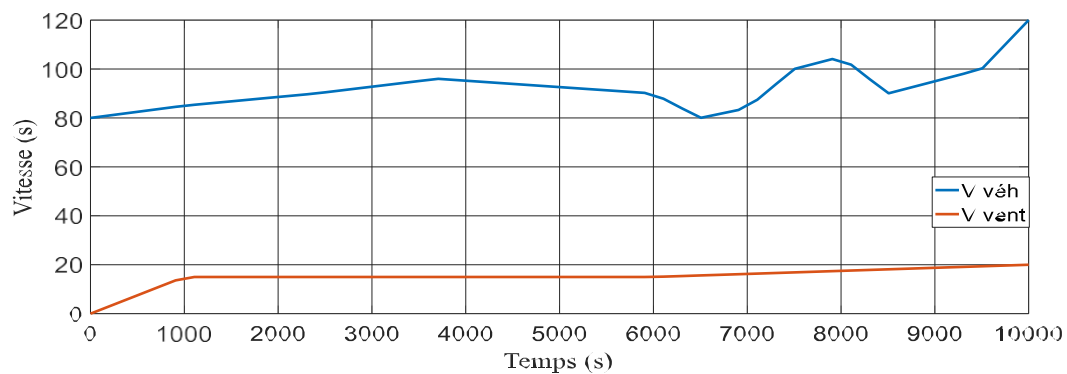


Figure III.77 Profils des vitesses de véhicule et de vent en fonction de temps

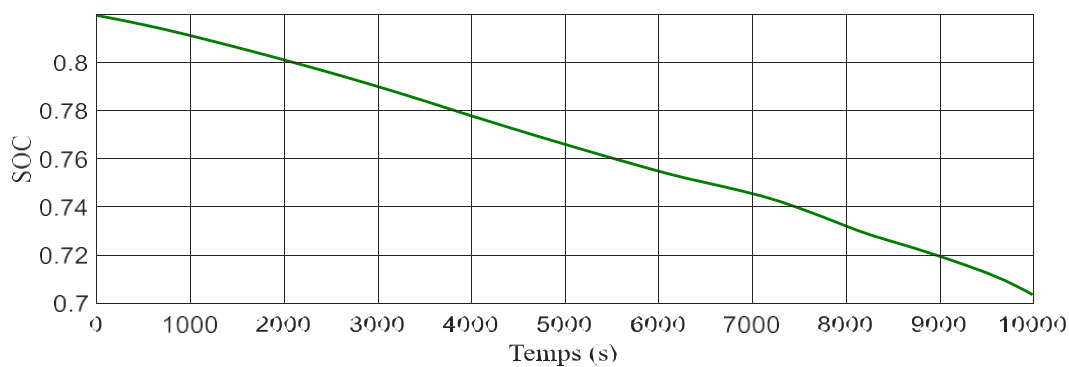


Figure III.78 Etat de chargement de groupe de batteries en fonction de temps

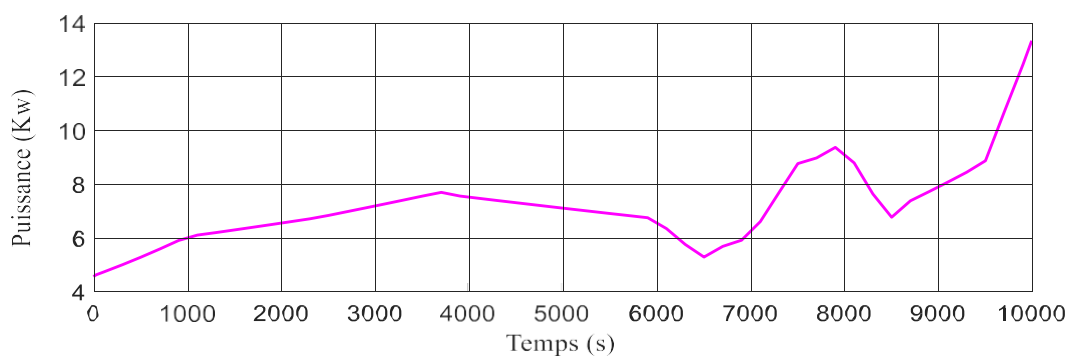


Figure III.79 Puissance nécessaire pour la traction électrique en fonction de temps

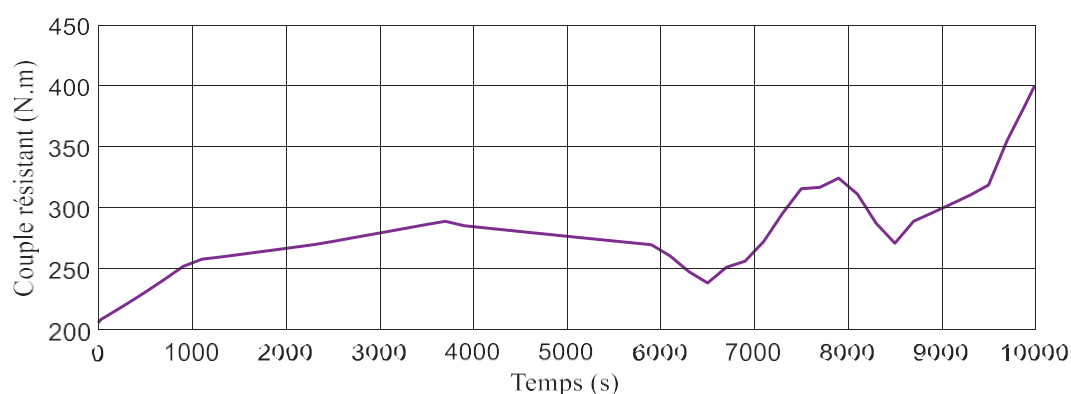


Figure III.80 Couple développé par moteur en fonction de temps

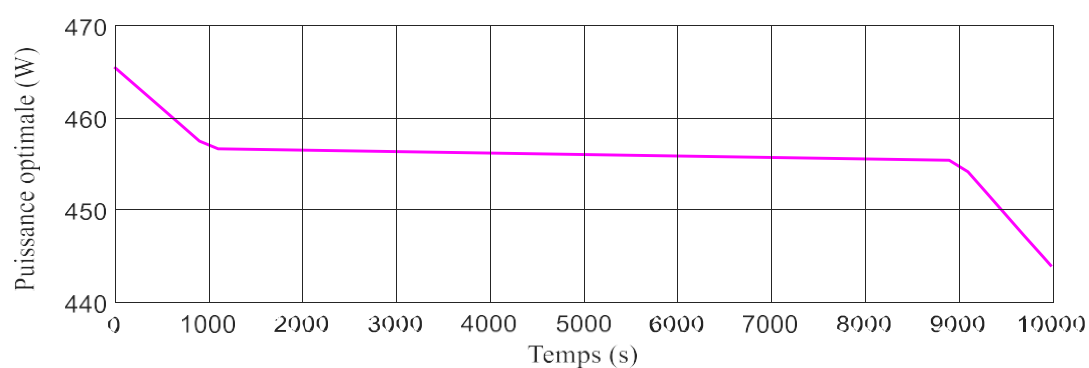


Figure III.81 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

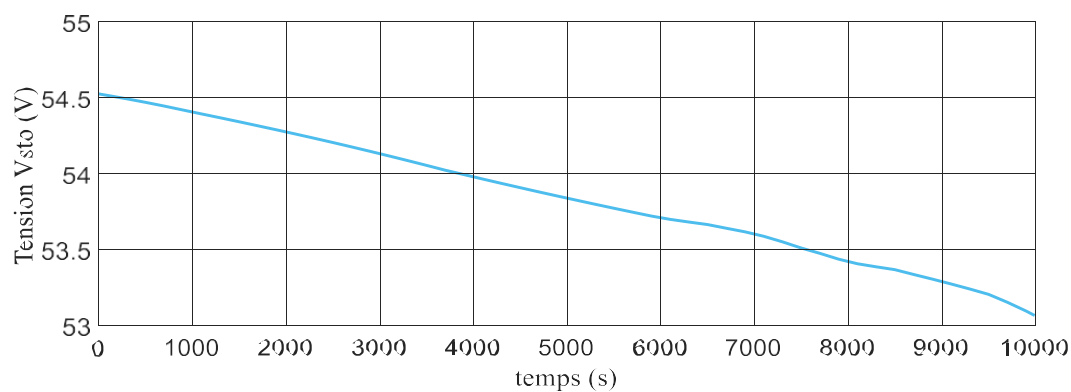


Figure III.82 Tension appliquée aux bornes des batteries de véhicule en fonction de temps

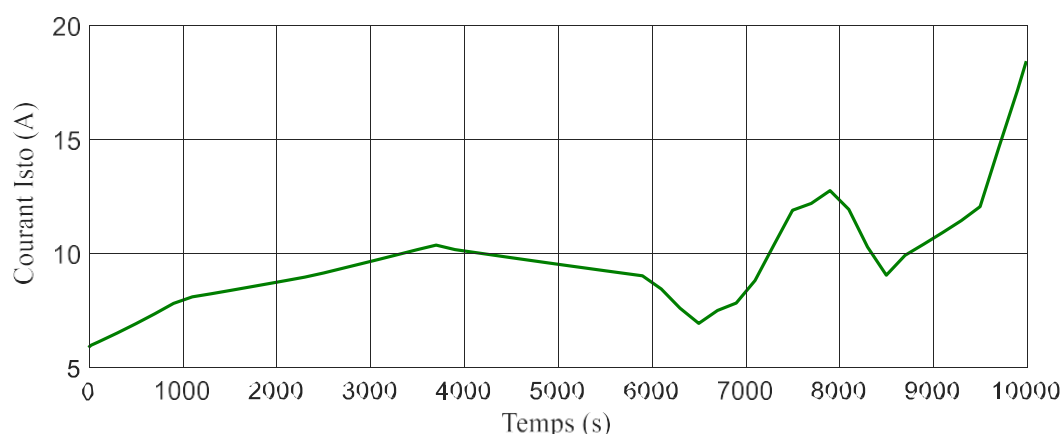


Figure III.83 Courant fourni /absorbé par la batterie en fonction de temps

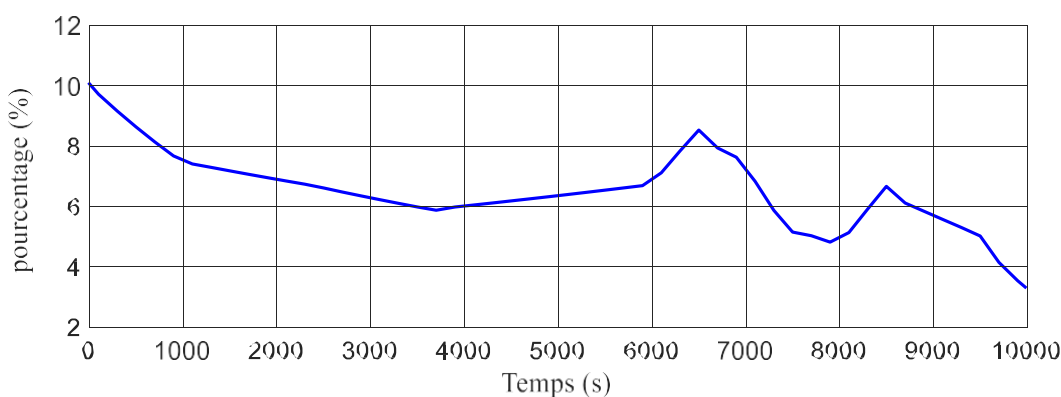


Figure III.84 Taux de contribution des panneaux photovoltaïques dans la puissance nécessaire pour la traction électrique

Commentaires:

- Le graphique présenté sur la Figure III.77 illustre le profil de vitesse du véhicule et du vent. La courbe bleue intitulée "V_veh", révèle l'évolution de la vitesse du véhicule. On y constate une accélération rapide au début, atteignant environ 80 km/h, suivie d'une phase de vitesse stable entre 80 et 90 km/h, puis une accélération finale vers 90- 100 km/h. La courbe rouge, "V vent", dépeint une vitesse du vent très faible et constante, proche de 0 km/h, avec de rares pointes à 15-20 km/h ;
- La figure III.78 met en évidence une décharge progressive et régulière de la batterie. La courbe verte indique que l'état de charge (SOC) diminue de manière linéaire, passant d'environ 0,8 (80 %) à légèrement moins de 0,7 (70 %) sur l'ensemble de la durée de la simulation ;
- On observe dans la figure III.79 que la puissance demandée par le moteur, présente plusieurs pics importants dépassant les 10 kW, notamment durant les phases d'accélération et de conduite à haute vitesse. En revanche, la puissance reste modérée lorsque le véhicule roule à vitesse constante ;

- La courbe de la figure III.80 illustre le couple moteur délivré au cours du cycle. La courbe a une évolution similaire à celle de la puissance, avec des valeurs atteignant jusqu'à 400 N.m lors des sollicitations les plus fortes, traduisant l'adaptation du moteur à la demande de traction ;
- La figure III.81 présente la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques. La courbe montre une production relativement stable autour de 455 W, avec une légère baisse au début de la simulation et une diminution plus marquée en fin de cycle, indiquant une influence progressive des conditions d'ensoleillement ou de température ;
- Dans la figure III.82, on remarque une baisse graduelle de la tension de la batterie au fur et à mesure de sa décharge. Le tracé met en évidence une chute de tension passant d'environ 54,5 V à un peu moins de 53,0 V, ce qui reste conforme au comportement typique d'un accumulateur en décharge ;
- La figure III.83 met en lumière les variations du courant fourni par la batterie. La courbe verte traduit des fluctuations en fonction de la demande de puissance : le courant augmente jusqu'à environ 20 A lors des fortes sollicitations, et diminue durant les phases de fonctionnement plus modéré ;
- La figure III.84 illustre l'évolution du taux de contribution des panneaux photovoltaïques à la traction électrique. La courbe montre une contribution généralement faible, oscillant entre 4 % et 10 %, avec une tendance à diminuer lorsque la puissance demandée par le véhicule est élevée, et à augmenter dans les phases de faible sollicitation.

III.3 Conclusion

Ce chapitre révèle que les performances du véhicule électrique solaire sont étroitement liées aux conditions environnementales (intensité de l'ensoleillement, température ambiante, vitesse du vent, déclivité de la route) et au profil de conduite adopté. En milieu urbain (basses vitesses), les panneaux photovoltaïques atténuent la consommation énergétique sous un fort ensoleillement, mais leur contribution diminue significativement en cas d'irradiation modérée ou faible, augmentant la dépendance à la batterie. En contexte semi-urbain (vitesses intermédiaires), l'impact combiné du vent et des pentes limite l'efficacité solaire, particulièrement sous une faible exposition lumineuse. En cycle routier (vitesses élevées et constantes), l'énergie solaire soutient l'autonomie, mais la batterie demeure cruciale pour répondre aux demandes énergétiques soutenues. La recharge stationnaire confirme la viabilité de l'alimentation par panneaux solaires, tandis que la synergie entre capteurs solaires et stockage en déplacement assure une gestion énergétique adaptable face aux variations externes, mettant en lumière l'importance d'algorithmes (MPPT/P&O) pour optimiser l'équilibre entre production et consommation selon les contraintes dynamiques.

Conclusion générale

Dans un contexte énergétique mondial en pleine mutation et face à l'impératif de réduire notre empreinte carbone, la transition vers une mobilité plus durable est cruciale.

Cette étude a exploré le potentiel significatif de l'intégration des panneaux photovoltaïques dans les véhicules électriques rechargeables, offrant une solution prometteuse pour améliorer leur autonomie et réduire leur dépendance au réseau électrique. Au terme de nos travaux, il est manifeste que l'intégration photovoltaïque apporte des bénéfices tangibles aux performances énergétiques des véhicules électriques. La modélisation détaillée de la dynamique du véhicule, du générateur photovoltaïque, et du système de stockage par batterie a permis de simuler avec précision le comportement du système combiné.

Les résultats obtenus, notamment à travers les simulations numériques sous MATLAB/Simulink, ont confirmé que l'énergie solaire captée peut significativement contribuer à la recharge de la batterie et, par conséquent, à l'extension de l'autonomie du véhicule, particulièrement dans des conditions d'ensoleillement favorables. Nous avons pu démontrer que cette synergie entre le véhicule électrique et la production d'énergie solaire embarquée offre une voie vers une mobilité plus autonome et plus respectueuse de l'environnement, en minimisant la consommation d'énergie provenant de sources non renouvelables.

L'analyse des différents profils de route et des niveaux d'ensoleillement a mis en lumière l'adaptabilité et l'efficacité de cette solution dans diverses situations d'utilisation. En définitive, cette étude renforce l'idée que l'intégration photovoltaïque représente une étape clé dans l'évolution des véhicules électriques vers une plus grande efficacité énergétique et une autonomie accrue.

Les modèles et les simulations développés fournissent une base solide pour de futures recherches et développements technologiques, ouvrant la voie à des véhicules électriques non seulement propres, mais aussi partiellement auto-suffisants en énergie, contribuant ainsi activement à la construction d'un futur énergétique plus durable.

Références bibliographiques

- [01] J.Larminie, J.Lowry, « Electric Vehicle Technology Explained », (2nd Edition, Wiley, (2012).ISBN: 978-1119942733.
- [02] Boucha, « Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpaceembarqué », Mémoire De Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 2015.
- [03] <https://librairie.Ademe.fr>. visité le 2 Mai 2025.
- [04] C.Espanet, « Modélisation et conception optimale de moteurs sansbalais à structure inversée Application au moteur-roue », Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Janvier 1999.
- [05] <https://hyundaijordan.com>. visité le 2 Mai 2025.
- [06] G. Malloy, M.Lachapelle, « Essence, Hybride ou électrique: ce qu'il faut savoir », Association Canadienne des Automobilistes Canada2019.
- [07] A.Chenouf, H.Gafsi, « Commande par logique floue de la machine à réluctance variable à commutation électronique (MRVCE) pour la traction des véhicules électriques légers », Mémoire de Magister, Université des Sciences de Technologie d'Annaba 2021.
- [08] <https://www.transbus.org>. visité le 7 Juin 2025.
- [09] <https://www.qovoltis.com>. visité le 4 Mai 2025.
- [10] A.Serrar, « Etude et Conception des Système de Recharge Solaire pour voiture électrique », Thèse de doctorat Université Québec Canada2019.
- [11] M. Benahdjoub, « Modélisation et commande d'un véhicule électrique alimenté par système PV/batterie », Université Ibn-Khaldounde Tiaret.
- [12] <https://www.accruent.com/resources/blog-posts/energy-management-system>.
- [13] B.Quentin, « Etude de mécanisme et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile », Thèse de doctorat Université Paris sud2020.
- [14] T. Efram and P.L. Chapman, « Comparison of photovoltaicarray maximum power point tracking techniques », IEEE Transactions on energy conversion, vol .22, no. 2, pp. 439-449, 2008.
- [15] <https://www.automobile-propre.com/voitures/hyundai-ioniq-5/>, visité 2 Mai 2025.
- [16] Berboucha, K. Djermouni, K.Ghedamsi, D.Aouzellag « Modeling and control of multilevel inverter for grid connected photovoltaic system ». ICPEA, № 159, Djelfa, novembre 2013.
- [17] V. Dussault, « Réflexion critique sur le plan d'action 2011 – 2020 sur les véhiculesélectriques du gouvernement du québec :enjeux et efforts pour un changement de comportement. Essaiprésenté en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.) », Université de Sherbrooke, Québec,2013.
- [18] YaëlThiaux, « Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides Évaluation du potentiel de la

technologie Li-ion. Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, France », 2010

- [19] Victor Mester, « Conception optimale systématique des composants des chaînes de traction électrique », Thèse de doctorat, école centrale de Lille, France, 2007.
- [20] J.Y. Wong, « Theory of Ground Vehicles, Third Edition, John Wiley & Sons », Inc., 2001, ISBN:0-471-35461-9.

Annexe



Le constructeur coréen Hyundai commercialise un véhicule électrique moderne et haut de gamme baptisé Hyundai-Ioniq5. Ce modèle qui aille design futuriste et technologie avancée, se distingue par ses performances élevées et son autonomie importante. Son prix varie en fonction des versions, mais se situe généralement autour de 47000 pour la version de base, pouvant dépasser 60000 pour les modèles mieux équipés.

Côté performances, la Hyundai Ioniq5 peut accueillir jusqu'à 5 passagers et propose une autonomie comprise entre 384km et 507km selon la capacité de batterie choisie (58Kwh ou 77,4Kwh). Sa vitesse maximale atteint 185km/h et elle peut passer de 0 à 100km/h en 5,1 secondes pour la version à transmission intégrale. La recharge peut s'effectuer sur une prise domestique, une borne rapide ou ultra-rapide, avec une capacité de recharge allant jusqu'à 350kw permettant de récupérer 80% de la batterie en seulement 18 minutes.

Le modèle est aussi équipé de panneaux solaires intégrés (dans certaines versions), qui permettent de recharger la batterie 12V et alimenter des fonctions auxiliaires.

Côté dimensions, la Hyundai-Ioniq5 mesure 4,64 m de long, 1,89 m de large et 1,6 m de haut, avec un poids variant entre 1830 kg et 2100 kg selon les versions.