

Étude sur l'implantation d'un système de recharge sans fil au sein d'une autoroute

Asma Boukhchana
Proceeds, Energies,
Environment and Electrical Systems,
National Engineering School of Gabes,
University of Gabes, Tunisia
asma.boukhchana@gmail.com

Aymen Flah
Proceeds, Energies,
Environment and Electrical Systems,
National Engineering School of Gabes,
University of Gabes, Tunisia
flahaymening@yahoo.fr

Lassaad Sbita
Proceeds, Energies,
Environment and Electrical Systems,
National Engineering School of Gabes,
University of Gabes, Tunisia
lassaad.sbita@gmail.com

RESUME -La charge du véhicule est désormais un sujet très important, non seulement en raison du contexte géopolitique et environnemental du moment, mais aussi en raison des possibilités technologiques. Ce travail se focalise sur la recharge dynamique sans fil en utilisant le système photovoltaïque. Ce dernier permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique afin d'alimenter le système de recharge du VE. Dans ce travail, nous avons présenté les éléments nécessaires du système de recharge et d'identifier les équations mathématiques qui régissent le système. Les résultats de simulation ont été réalisés à l'aide de Matlab Simulink et ANSYS qui nous aident de tester l'influence de la vitesse du véhicule sur les performances de charge sans fil et de tester l'influence de changement climatique sur l'état de charge de batterie.

Mots-clés— Véhicule électrique, recharge dynamique, transfert d'énergie sans fil, photovoltaïque.

1. INTRODUCTION

Dans nos jours, l'automobile est une nécessité qui fait partie intégrante de notre quotidien. La dépendance croissante au carburant du fait des nuisances sonores, des gaz à effet de serre et d'autres facteurs tel que la situation géopolitique, a conduit à un regain d'intérêt pour les énergies renouvelables, notamment leur utilisation en substitution des véhicules thermiques. Le véhicule électrique (VE) est une solution développée par les constructeurs automobiles pour remplacer progressivement les véhicules traditionnels [1].

L'une des options de transport les plus propres et les plus écologiques est le VE. De plus, le secteur du transport routier émet plus de matières polluantes dans l'atmosphère que l'industrie, ce qui en fait une alternative efficace à la pollution des autres modes de transport. Pour donner l'impulsion nécessaire à l'arrivée du VE, des infrastructures de recharge publiques et privées doivent être déployées tout en assurant une couverture suffisante. Ces infrastructures de recharge peuvent être alimentées par le réseau électrique ou par des sources d'énergie renouvelables. Lors de l'utilisation de ces différentes sources d'énergie, les modes de recharge (rapide ou progressive) peuvent différer, nécessitant le dimensionnement des systèmes de recharge et la modification des installations. Habituellement, les systèmes de véhicules électriques sont basés sur divers modules qui doivent assurer la haute puissance et la stabilité du véhicule sur la voie. La majorité de ces composants sont liés au mécanisme de charge [2].

À cet égard, le transfert de puissance sans fil dynamique est une méthode pratique pour résoudre les problèmes du véhicule électrique [3]. En contrepartie, la relation de ce système de recharge à la source énergétique qui provient du réseau électrique présente un inconvénient majeur. L'utilisation des sources plus étendues comme les générateurs PV est, de ce fait, envisagée comme une éventuelle solution [4], [5]. C'est dans ce même cadre que s'inscrit notre travail, qui cherche à étudier l'influence et la performance de ce croisement de techniques de recharge sans fil avec une source PV pour application d'une autoroute.

2. PRESENTATION ET MODELISATION DU SYSTEME DE RECHARGE

Dans cette étude, on a utilisé des panneaux photovoltaïques afin d'alimenter le système de recharge sans fil. Ces derniers génèrent le courant DC. Ils sont raccordés par un convertisseur boost pour augmenter la tension d'alimentation de celle de la charge. Ce convertisseur est connecté à l'onduleur qui convertit le courant DC en courant AC pour alimenter la bobine émettrice. Cela crée un champ magnétique, qui transforme l'énergie magnétique en énergie électrique dans le but d'alimenter la bobine réceptrice. Cette bobine est liée au redresseur qui convertit le courant AC en courant DC pour charger la batterie du véhicule électrique.

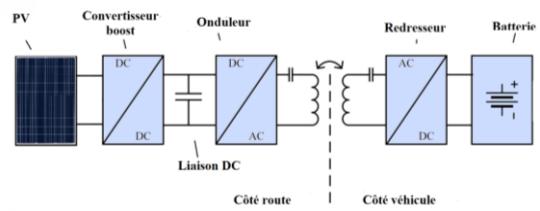


Fig. 1. Présentation du système de recharge

2.1. Modélisation du système sans fil :

Il existe deux types de recharge ; le premier c'est la recharge statique que plusieurs compagnies utilisent et continuent de développer. Nous citons par exemple le Waseda Electric Bus au Japon avec une puissance qui varie entre 30 kW et 150 kW pour une distance entre bobines émettrice et réceptrice de 105 mm. Dans ce système, le véhicule se recharge à chaque passage dans les arrêts de bus [6].

Le deuxième type de recharge s'appelle recharge dynamique. Dans ce type de recharge, le véhicule se charge en roulant. Cela se fait à partir d'une voie spécialement équipée où sont disposées des bobines qui ne s'activent que lors du passage du véhicule. Cette solution offre la possibilité de réduire la capacité des batteries embarquées dans le véhicule, et donc de réduire son poids et son prix.

2.1.1. Modèle statique :

La figure 2 montre une représentation simplifiée de ce système de transfert de puissance.

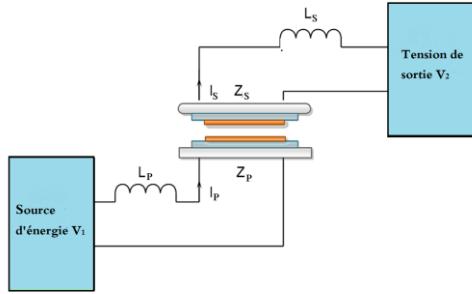


Fig. 2. Schéma simplifié du système de recharge sans fil

Les tensions d'entrée et de sortie du système de transfert d'énergie sont désignées par V_p et V_s comme c'est le cas dans l'équation (4) et (5) [7]. Le modèle de couplage à inductance mutuelle peut être représenté à partir de l'équation (1), car il est en relation avec la formulation d'impédance [8] :

$$Z_{(p,s)} = j\omega M I_{(p,s)} \quad (1)$$

Avec : $K = -1$ pour Z_p et $K=1$ pour Z_s

Où :

M : L'inductance mutuelle.

ω : La fréquence angulaire.

$I_{(p,s)}$: Les courants primaire et secondaire.

Le coefficient de couplage magnétique est lié à l'inductance mutuelle par l'équation (2) :

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (2)$$

Cette équation indique que les fréquences de résonance primaires et secondaires sont les mêmes :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_{(p,s)} L_{(p,s)}}} = 2\pi f \quad (3)$$

La tension primaire peut être écrit comme suit :

$$V_p = j2\pi f_r L_p I_p - j2\pi f_r M I_s \quad (4)$$

La tension secondaire est exprimée par cette relation :

$$V_s = j2\pi f_r M I_p - j2\pi f_r L_s I_s \quad (5)$$

2.1.2. Modèle dynamique :

La figure 3 illustre le flux magnétique transmis par la bobine émettrice vers la bobine réceptrice. Même si l'espace entre les centres des bobines est petit, la quantité de flux et d'énergie transférés sera plus grande [7].

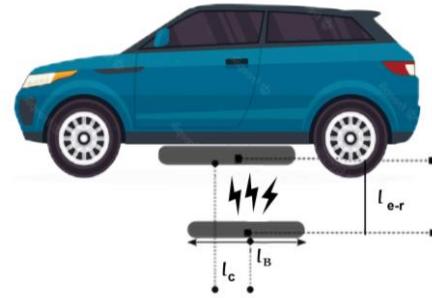


Fig. 3. Le flux magnétique transmis par la bobine émettrice

Les expressions des flux magnétiques des bobines primaire et secondaire peuvent être exprimés comme étant :

$$\begin{cases} \phi_p(t) = \left(\frac{\mu_0 \cdot S \cdot N^2}{l}\right) I_p(t) \\ \phi_s = \varepsilon \cdot \phi_p \end{cases} \quad (6)$$

Où :

N : Le nombre de tours.

l : La longueur du solénoïde.

S : La surface est S .

μ_0 : La constante magnétique.

ε : La quantité du flux obtenue.

La nouvelle méthode de modèle dynamique du système de recharge sans fil est basée sur le paramètre ε . Le tableau suivant présente la relation entre le paramètre ε , la longueur l_{e-r} entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice, la longueur qui définit le décalage entre les centres de deux bobines l_c et la longueur de la bobine émettrice l_B .

Tableau I. La relation entre les paramètres ε et les longueurs qui définissent le champ

Paramètre ε	Les longueurs l_c and l_B
$\varepsilon = 0$	$l_c > l_B$
$\varepsilon = 1$	$l_c = 0$
$0 < \varepsilon < 1$	$0 < l_c < l_B$

Il est noté que le facteur d'inductance « L » est lié à la forme de la bobine ; dans ce cas, la forme est en spirale basée sur le modèle rectangulaire plat. Par conséquent, « L » peut être écrit comme l'équation :

$$L = K_1 B_0 \frac{N d_m}{1 + K_2 \rho} \quad (7)$$

Où :

K_1 et K_2 : Les coefficients empiriques (avec $K_1=2,34$ et $K_2=2,75$).

B_0 : La perméabilité au vide ($B_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$).

d_m : La diamètre moyen.

ρ : Le taux de remplissage de la bobine.

Avec :

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (8)$$

Le taux de remplissage ρ reflète à quel point la spirale est creuse.

Dans le cas d'un petit modèle ρ , la bobine est creuse ($d_{out} \approx d_{in}$) et dans le cas d'un grand modèle ρ , la bobine est pleine ($d_{out} \gg d_{in}$).

La figure suivante présente les caractéristiques d'enroulement.

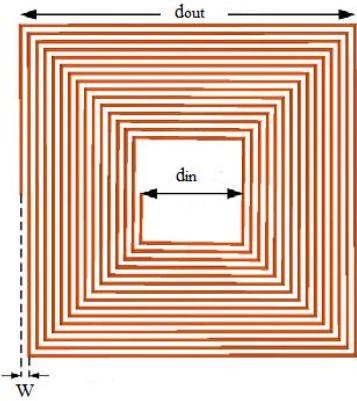


Fig. 4. Les caractéristiques d'enroulement.

2.2. Définition et modélisation de source énergétique principale :

Nous évitons d'utiliser la source d'énergie à travers les réseaux et nous mettons l'accent sur l'exploitation de l'énergie solaire pour la recharge des VE car elle est considérée comme énergie verte et elle n'émet pas de gaz à effet de serre ou de dioxyde de carbone. Cette énergie permet de produire l'énergie électrique grâce à des panneaux photovoltaïques. Donc l'énergie solaire est considérée comme une source énergétique principale de ce système.

Un panneau PV est formé de plusieurs cellules solaires qui sont connectées en série et en parallèle pour permettre de produire la quantité de tension et du courant désirés. Le circuit équivalent du modèle général est composé du photo-courant I_{ph} , du courant de diode, d'une résistance parallèle R_{sh} , et d'une résistance en série R_s [9],[10].

D'après l'utilisation de la loi de Kirchhoff dans la figure 5, le courant de la cellule est exprimé comme suit :

$$I_c = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (9)$$

Où :

I_{ph} : Le photo-courant (produit par la lumière),

I_{sh} : Le courant de résistance parallèle.

Alors le courant I_{sh} peut être écrit comme suit :

$$I_{sh} = \frac{V_c + R_s I_c}{R_{sh}} \quad (10)$$

Le courant de saturation est proportionnel au courant de diode I_D . Alors l'équation du I_D est exprimée par cette relation :

$$I_D = I_{sd} \times \left[\exp\left(\frac{q(V_c + R_s I_c)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

Où :

I_{sd} : Le courant inverse de saturation,

q : Charge de l'électron ($1, 6.10^{-19} \text{ C}$),

K : Constante de BOLTZMAN ($1, 38.10^{-23} \text{ J/}^\circ \text{K}$),

T : La température de cellule mesurée en Kelvin (K),

n : Facteur d'idéalité de la diode.

Nous remplaçons l'équation tension-courant caractéristique d'une cellule solaire dans l'équation (9). Nous trouvons l'équation suivante :

$$I_c = I_{ph} - I_{sd} \times \left(\exp\left(\frac{q(V_c + R_s I_c)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) - \frac{V_c + R_s I_c}{R_{sh}} \quad (12)$$

Selon l'équation ci-dessous, l'irradiation et la température de fonctionnement de la cellule ont un rôle majeur dans la détermination du photo-courant :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (13)$$

La structure globale du générateur PV est donnée par la figure suivante :

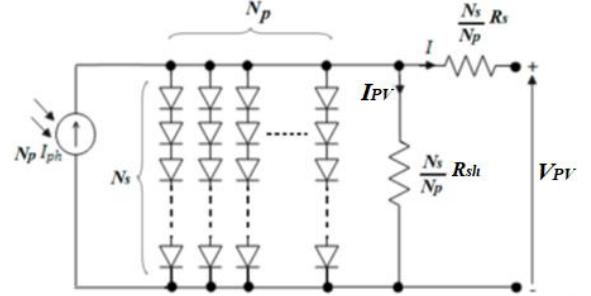


Figure 5. Générateur photovoltaïque.

En considérant le même éclairage et la même température pour tout le panneau ; le courant généré peut être décrit comme suit :

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_{sd} \cdot \left[e^{\frac{q(V_c + R_s I_c)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \left(\frac{N_p V_c + R_s I_c}{R_{sh}} \right) \quad (14)$$

3. MOTIF 3D DE BOBINE DU SYSTEME DE RECHARGE

Le motif 3D des bobines émettrice et réceptrice a été réalisée à l'aide d'ANSYS Maxwell. La distance entre les deux bobines de cuivre est de 200 mm. Une plaque rectangulaire transparente a été positionnée pour enregistrer le champ magnétique qui a été produit entre elles, comme montre la figure 7. Les simulations seraient effectuées dans une zone mesurant (1200 mm, 2400 mm et 1200 mm). La solution conçue par le biais du logiciel ANSYS Maxwell est d'établir une limite pour l'emplacement des deux bobines. La conception des bobines émettrice et réceptrice est illustrée par figure 6.

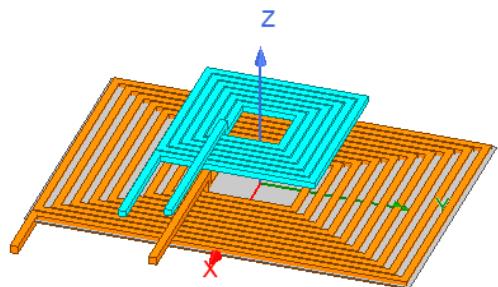


Fig. 6. Conception des bobines émettrice et réceptrice

Les tableaux au-dessous présentent les différents composants des bobines émettrice et réceptrice [11]:

Tableau II. Composants de bobine émettrice.

Paramètres	Variables	Valeur
Longueur de bobine primaire dans la direction X	L_{px}	800 mm
Longueur de bobine primaire dans la direction Y	L_{py}	1200 mm
Largeur de la bobine primaire	l_p	25 mm
Nombre de tours du côté primaire	N_p	10

Tableau III. Composants de bobine réceptrice.

Paramètres	Variables	Valeur
Longueur de bobine secondaire dans la direction X	L_{sx}	500 mm
Longueur de bobine secondaire dans la direction Y	L_{sy}	500 mm
Largeur de la bobine secondaire	l_s	25 mm
Nombre de tours du côté secondaire	N_s	6

La figure 7 montre le champ magnétique entre les deux bobines, plus la bobine réceptrice s'éloigne de centre de bobine émettrice plus la valeur du champ magnétique diminue.

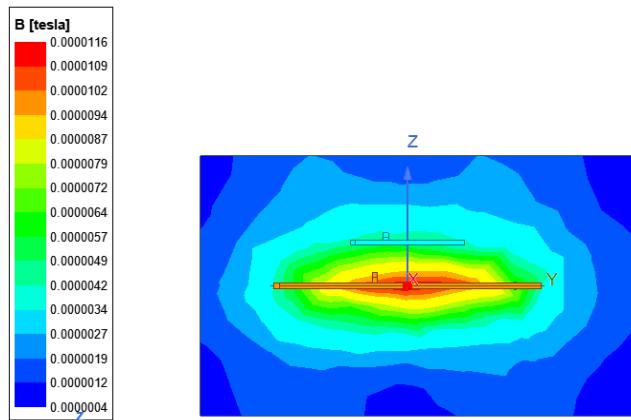


Fig. 7. Le champ magnétique les bobines émettrice et réceptrice.

4. CONCEPT DU SYSTEME DE RECHARGE SANS FIL SUR L'AUTOROUTE :

On a utilisé le logiciel ANSYS Electronics pour dessiner le schéma global du système de recharge sans fils.

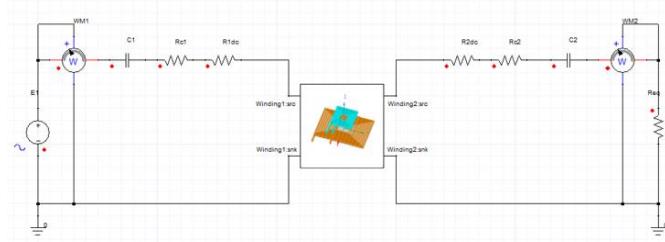


Fig. 8. Montage du système de recharge sans fils

La figure 8 présente le montage de recharge sans fils avec topologie SS. Dans la partie primaire, on a la source d'énergie de fréquence 150 kHz et d'amplitude 280 V. Au milieu, on a les deux bobines émettrice et réceptrice. Pour calculer les différentes caractéristiques, il y a deux wattmètres.

Tableau IV. Les valeurs des composants du circuit électrique.

Composant	Valeur
Condensateur C1	27.16 nF
Résistance RC1	14.38 mΩ
Résistance R1dc	12.2 mΩ
Condensateur C2	27.16 nF
Resistance RC2	14.38 mΩ
Resistance R1dc	12.2 mΩ

La figure 9 présente la courbe des tensions d'entrée et de sortie. On observe à partir de cette courbe que la tension d'entrée est sous forme d'onde d'amplitude de 279,96 V. La tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée et a une amplitude de 257,23 V en régime permanent.

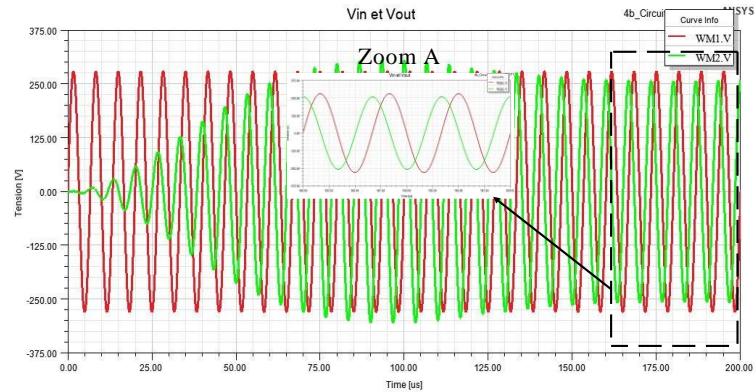


Fig. 9. Courbe des tensions d'entrée/sortie.

La figure 10 présente la courbe des courants d'entrée et de sortie. À travers la petite partie de l'état stable (zoom B), les valeurs maximales du courant peuvent être lues comme suit ; le courant d'entrée est de 85,36 A et le courant de sortie est de 85,74 A.

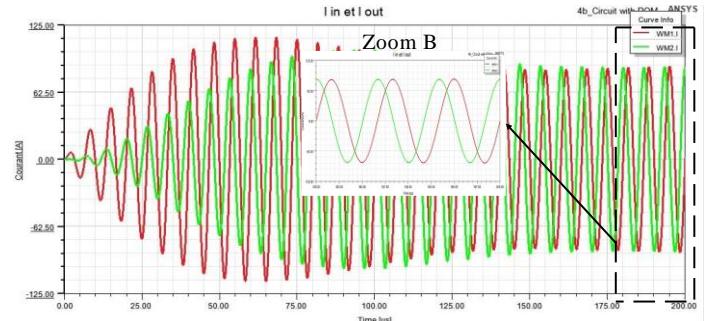


Fig. 10. Courbe des courants d'entrée/sortie.

On peut observer à partir de la figure 11 que la courbe des puissances d'entrée/sortie est présente sous forme d'onde en régime permanent, que la puissance d'entrée est de 53.7 KW (max) et que la puissance de sortie est plus en retard que la puissance d'entrée avec une valeur maximale égale à 47.16 KW (max). À partir des résultats du rapport établi entre les puissances d'entrée et de sortie, le rendement est d'environ 87.82%.

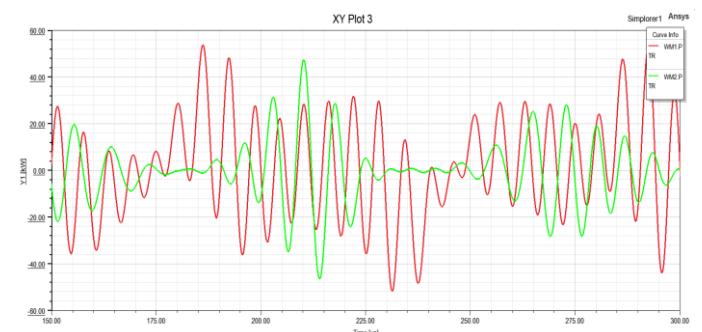


Fig. 11. Courbe des puissances d'entrée/sortie.

Nous utiliserons une autoroute à plusieurs voies mais ayant une seule direction, avec une recharge sans fil dans la voie la plus à droite. Cette dernière est séparée par N sections, chacune mesurant L de longueur. Dans la partie L , l'autoroute est équipée de centrales photovoltaïques, chaque centrale est placée dans une section pour recharger les véhicules.

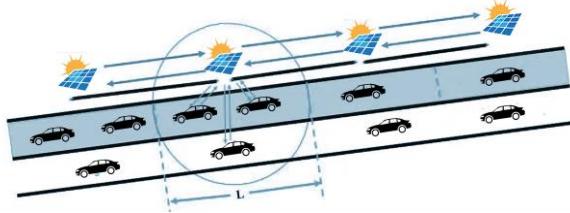


Fig. 12. Le modèle d'infrastructure de recharge sans fil.

Une voie d'autoroute de 10 km est équipée de 5000 bobines de distance 120 cm. L'espace entre elles est égal à 80 cm, comme illustré à la figure 13.

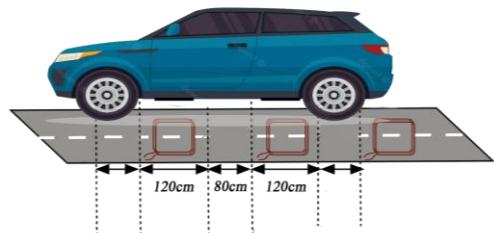


Fig. 13. Composition d'une voie d'autoroute.

Dans chaque segment de 1km d'une autoroute de 10km, existe une centrale photovoltaïque. Pour que les véhicules soient chargés convenablement, il faut mettre un onduleur pour chaque 10 bobines et des switchers pour chaque bobine afin de faciliter la permutation entre elles lors du chargement. La figure 14 l'illustre bien :

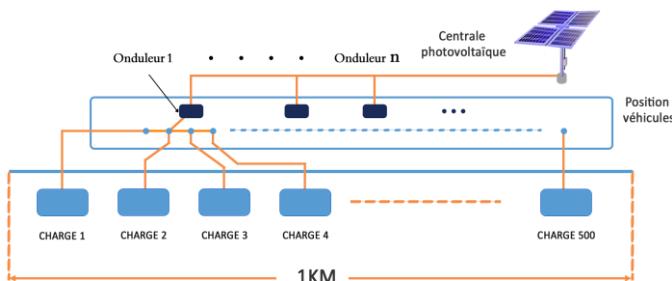
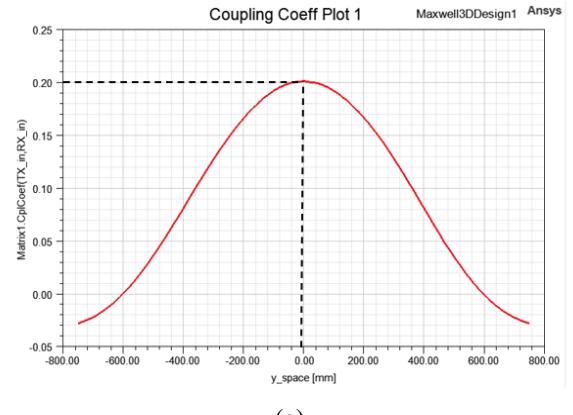


Fig. 14. Position du champ photovoltaïque.

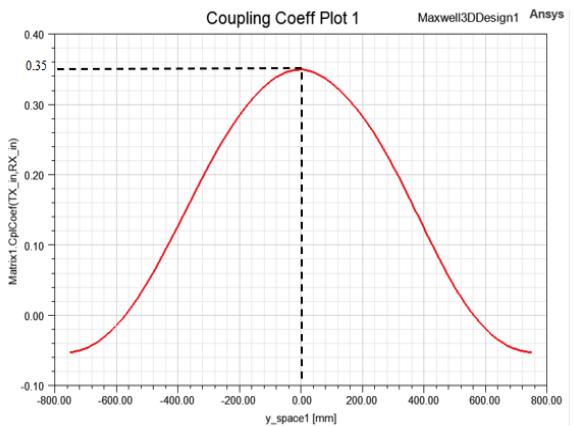
5. SIMULATIONS ET RESULTATS :

L'efficacité et les performances globales du système ont été évaluées à l'aide de la plate-forme de simulation Matlab. En effet, les résultats ont été représentés pour le cas d'un véhicule électrique qui parcourra un kilomètre d'autoroute équipé d'un chargeur sans fil. Un kilomètre contient 500 émetteurs.

Il est obligatoire de mentionner que la distance entre les bobines émettrices et les bobines réceptrices influence la quantité de puissance transférée. La figure 15 donne une idée de l'effet de la distance entre l'émetteur et le récepteur.



(a)



(b)

Figure 15. Courbe du coefficient de couplage dans le cas où les centres des deux bobines sont confondus.

Sur la figure (15. a) on remarque que la courbe du coefficient de couplage augmente jusqu'à elle s'atteint sa valeur maximale à 0,20 pour une distance entre les deux bobines égale à 200 mm, sur la figure (15. b) on observe que la courbe du coefficient de couplage augmente jusqu'à 0,35 pour un espace entre les bobines émettrice et réceptrice égal à 100 mm. Plus la distance entre les deux bobines est petite, le coefficient de couplage sera plus élevé.

Comme montre le tableau V, pour une vitesse du véhicule de 30 km par 3600 s, la bobine émettrice de 120 cm peut recharger le véhicule dans une période de 0,144 s comme le montre la figure 16. Ainsi dans un segment de 1 km qui contient 500 bobines le temps de recharge est égal à 120s. Ce tableau montre que plus la vitesse du véhicule augmente, plus le temps nécessaire pour recharger la batterie diminue.

Le diagnostic des résultats tentera d'étudier l'impact de la vitesse du véhicule sur l'état de charge pour des conditions climatiques constantes, que supposées maximales au test initial et variables en cas du test suivant. L'état de charge initial de la batterie est supposé à 50%, c'est-à-dire que lorsque le véhicule sera dans la zone de la section de recharge sans fil, son état de charge est égal à 50%. La vitesse du véhicule a été supposée constante pendant toute cette période et elle est égale à 30 km/h. Avec cette vitesse, le véhicule traversera la zone de recharge en 120 secondes. Cela signifie que le véhicule sera connecté à chaque émetteur pendant 0,24 seconde. La figure 16, donne les différentes dimensions du système global que présente le véhicule sur la route rechargeable. Sur la base des spécifications données et de la vitesse du véhicule mentionnée, chaque bobine doit être traversée en 0,144 seconde.

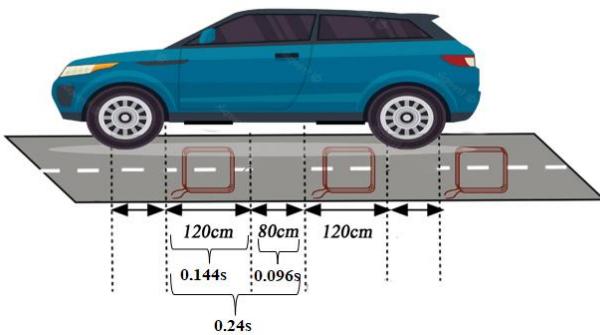


Fig. 16. Le temps équivalent nécessaire pour traverser la bobine à 30km/h.

À la base de ces spécifications et en concentrant sur la vitesse la plus basse étudiée (30 km/h), l'état de charge de batterie varie jusqu'à 0,05 % en 5 secondes, pour le meilleur facteur d'efficacité d'irradiation, donc en gardant la même spécification sur la route et le véhicule, dans ce cas la batterie atteint une valeur de 51,2% en tant que nouveau SOC. En fait, ce cas est le meilleur, car la vitesse nécessaire au véhicule est la plus faible et le temps de recharge est le plus élevé. La figure 17 montre l'évolution du SOC.

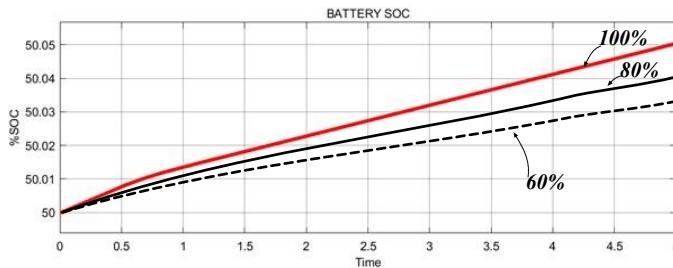


Fig. 17. Évolution du SOC sous 30 km/H en 5 secondes comme temps de simulation et pour trois facteurs d'irradiation.

Les résultats de la figure 17 montrent que le rayonnement solaire peut influencer sur la rentabilité du système. Cette étude a un guide pour le tableau V, qui peut estimer le nombre d'émetteurs nécessaires pour chaque vitesse et pour avoir une recharge complète à partir de 50 %.

Tableau V. Nombre de kilomètres nécessaires sur la route de recharge sans fil pour une recharge complète du VE.

Vitesse du véhicule	Temps de recharge pour une seule bobine	Temps de recharge total dans un Km	Evolution du SOC (%) dans un KM	Numéro d'émetteur nécessaire pour une charge complète	Distance totale nécessaire en Km
30 Km	0.144 s	120 s	1.2	20834	42
60 Km	0.072 s	60 s	0.72	34723	70
70 Km	0.0514 s	51.42 s	0.65	38462	78
90 Km	0.04 s	40 s	0.42	59524	120
100 Km	0.036 s	36 s	0.38	65790	132
110 Km	0.0327 s	32.72 s	0.32	78125	157

6. CONCLUSIONS

Dans ce travail, nous avons présenté les éléments nécessaires du système de recharge et d'identifier les équations mathématiques qui régissent le système. Ainsi, Nous avons présenté le motif 3D de bobine émettrice et réceptrice que nous avons réalisé sur l'ANSYS et d'exposer les résultats de simulation de leur champ magnétique. Matlab Simulink et ANSYS Maxwell ont été utilisés comme outils de simulation pour tester complètement l'efficacité du système de recharge à différentes vitesses et en utilisant une source d'énergie renouvelable basée sur le rayonnement solaire. Les résultats prouvent que même si la vitesse du véhicule est élevée, il sera nécessaire d'avoir un plus grand nombre d'émetteurs à bobine et donc plus de distance sur route devra être équipé de cet émetteur. L'étude a conduit à avoir 157 km équipés de plus de 78000 émetteurs pour avoir une recharge complète de la batterie en cas de démarrage de 50% en tant que batterie SOC.

Dans nos prochains travaux, nous pourrions ajouter une autre source d'énergie comme l'énergie éolienne qui pourrait contribuer à l'amélioration du système énergétique. Nous pourrions aussi planter des cellules piézoélectriques afin d'exploiter les vibrations causées par les perturbations de la route comme un troisième générateur d'énergie.

7. REFERENCES

- [1] X. Yin, S. Lu, Y. Wang, and Z. Du, "Wireless charging structure and efficiency analysis based on wind--solar hybrid power supply system," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 746–755, 2022.
- [2] S. Laporte, G. Coquery, V. Deniau, A. De Bernardinis, and N. Hautiere, "Dynamic wireless power transfer charging infrastructure for future evs: From experimental track to real circulated roads demonstrations," *World Electr. Veh. J.*, vol. 10, no. 4, p. 84, 2019.
- [3] "Transfert d'énergie sans fil pour véhicules électriques à la pointe de la technologie," *Energy Process*, vol. 162, pp. 24–37.
- [4] H. Zhang, F. Lu, and C. Mi, "An electric roadway system leveraging dynamic capacitive wireless charging: Furthering the continuous charging of electric vehicles," *IEEE Electrif. Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 52–60, 2020.
- [5] P. Venugopal *et al.*, "Roadway to self-healing highways with integrated wireless electric vehicle charging and sustainable energy harvesting technologies," *Appl. Energy*, vol. 212, pp. 1226–1239, 2018.
- [6] H. Turker, "Véhicules électriques Hybrides Rechargeables: évaluation des Impacts sur le Réseau électrique et Stratégies Optimales de recharge," Université de Grenoble, 2012.
- [7] S. Chopra, "Contactless power transfer for electric vehicle charging application," 2011.
- [8] N. Mohamed, F. Aymen, Z. M. Ali, A. F. Zobaa, and S. H. E. Abdel Aleem, "Efficient power management strategy of electric vehicles based hybrid renewable energy," *Sustainability*, vol. 13, no. 13, p. 7351, 2021.
- [9] T. T. Guingane, Z. Koalaga, E. Simonguy, F. Zougmore, and D. Bonkoungou, "Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel MATLAB/SIMULINK," *J. Int. Technol. l'Innovation, la Phys. l'Energie l'Environnement*, vol. 2, no. 1, 2016.
- [10] F. HANANOU and A. ROUABAH, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque," 2014.
- [11] S. Inoue, R. Nimri, A. Kamineni, and R. Zane, "A New Design Optimization Method for Dynamic Inductive Power Transfer Systems utilizing a Neural Network," in *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2021, pp. 1496–1501.