

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 114 (2023)
Heft: 6

Artikel: La mobilité solaire : un rêve ou une réalité?
Autor: Faes, Antonin / Cattaneo, Gianluca / Mujovi, Fahrudin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1053178>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 11.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



La mobilité solaire: un rêve ou une réalité?

Défis et solutions | Avec l'électrification galopante de la mobilité, l'intégration d'éléments photovoltaïques aux véhicules offrirait une solution pour diminuer les besoins de recharge à partir du réseau électrique. Mais le gain en énergie est-il vraiment significatif? Le projet SolarBody, mené par le CSEM et soutenu par l'OFEN, livre une partie de la réponse.

ANTONIN FAES, GIANLUCA CATTANEO, FAHRADIN MUJOVI, MATTHIEU DESPEISSE, JULIEN ROBIN

Les émissions de CO₂ d'origine humaine ont atteint un record absolu en 2022: 36,4 Gt! La mobilité est à l'origine d'approximativement un cinquième de ces émissions, dont environ 75% proviennent des transports routiers [1]. Ainsi, la décarbonation des transports passera, d'une part, par l'électrification des véhicules et, d'autre part, par une électricité à faible émission de CO₂.

Avec la vente de 14 millions de voitures électriques au niveau mondial, ce qui représente 18% du marché en 2023, l'électrification de la mobilité est en marche. Les pronostics de l'Agence internationale de l'énergie (IEA) prévoient une part de marché de 60% en 2030 pour les voitures électriques, que ce soit en Chine, aux États-Unis ou en Europe [2]. Quant à la décarbonation de la production d'électricité, une nette tendance à la baisse des émissions est observée en

Europe, avec une division par deux de l'intensité carbone entre 1990 et 2021 (de 500 à moins de 250 g CO₂-eq/kWh) [3], bien qu'au niveau mondial la valeur reste encore au-dessus de 400 g CO₂-eq/kWh en 2022 [4].

Une solution pour augmenter l'autonomie énergétique des véhicules électriques et diminuer la dépendance au mix énergétique local consisterait à produire l'électricité grâce à des panneaux photovoltaïques intégrés au véhicule (VIPV, Vehicle Integrated Photovoltaics). Cette solution est d'ailleurs préconisée dans la stratégie énergétique européenne depuis 2022 [5]. À noter qu'en Suisse, une surface d'un mètre carré reçoit annuellement l'équivalent d'un baril de pétrole (159 l) en énergie solaire. Avec une efficacité de conversion de 20%, une durée de vie de 25 ans et une surface de 1,7 m², un panneau solaire standard, une fois acquis,

produira en énergie électrique l'équivalent de 1000 l de mazout, le tout localement et sans émission de CO₂.

Du verre au polymère

L'histoire de la voiture solaire est étroitement liée à la Suisse. En effet, l'une des premières compétitions de véhicules électriques solaires au monde s'est déroulée de Romanshorn à Genève en 1985 [6]. Plusieurs compétitions ont ensuite vu le jour, dont la plus renommée est le World Solar Challenge, durant laquelle les bolides solaires parcourent les 3000 km entre Darwin et Adélaïde à plus de 100 km/h en moyenne [7].

Des produits automobiles avec photovoltaïque (PV) intégré sont actuellement disponibles sur le marché. Par exemple, la Toyota Prius possède en option un toit solaire depuis 2012, et les Hyundai Sonata et Ioniq 5 ont toutes deux en option un toit PV de plus de 200 W (figure 1). De

plus, de multiples start-up voient le jour et proposent des véhicules solaires: parmi celles-ci, Lightyear, qui a présenté en 2023 un premier prototype haut de gamme avec un design sans vitre arrière dédié à l'intégration PV, ou encore Aptera, une start-up nord-américaine qui propose une voiture à trois roues entièrement recouverte de modules solaires (figure 2). Même Tesla a annoncé et breveté de l'intégration solaire pour son futur CyberTruck [8].

Aujourd'hui, les produits PV sur le marché automobile sont basés sur une conception en verre qui les rend relativement lourds. De plus, pour des raisons de sécurité, ceux-ci ne peuvent recouvrir que le toit des voitures. Il existe donc une demande pour des solutions de modules PV en polymère. Il serait ainsi possible de réduire la consommation grâce à un poids plus faible, d'augmenter la résistance aux chocs en comparaison au verre et, finalement, de permettre une couverture quasi-totale de la surface extérieure des véhicules, et ce, même pour des formes de carrosserie complexes.

Les projets PVAB et SolarBody

Au Centre d'énergie durable (Sustainable Energy Center) du CSEM, à Neu-

châtel, le développement de cellules PV de nouvelle génération, de matériaux innovants et de designs de panneaux solaires pour les applications mobiles est en plein essor et va bon train. Ainsi, un concept spécial de module solaire léger, efficace et robuste, y a été développé et testé dans des conditions extrêmes. Le premier exemple d'intégration est l'avion stratosphérique SolarStratos de Raphael Domjan, avec un module PV pesant seulement $0,7 \text{ kg/m}^2$ et atteignant une efficacité de près de 22%. La seconde application concerne le secteur nautique: le CSEM a développé des matériaux permettant aux modules solaires légers de passer les tests de grêle tout en gardant une haute efficacité, ce qui a permis, entre autres, au Swiss Solar Boat fabriqué par les étudiants de l'EPFL de remporter la première place du championnat lors du Monaco Energy Boat Challenge 2022.

Depuis 2020, le CSEM fait partie du consortium du projet PV Automotive Body (PVAB) en tant que responsable du développement des modules VIPV. Le projet, guidé par Simoldes Plastics, fournisseur automobile et spécialiste de l'injection de polymères basé au Portugal, conceptualise, développe et

démontre une nouvelle architecture de modules photovoltaïques sans verre pour l'automobile [9]. Le consortium du projet inclut également le CEiiA, un centre d'ingénierie portugais, en tant que responsable du design et des calculs mécaniques, ainsi que le groupe automobile Stellantis comme utilisateur final. De plus, le projet SolarBody, dirigé par le CSEM et soutenu par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), a pour but de développer la lamination et la simulation des performances des modules PV courbés ainsi que l'électronique spécifique, et ce, afin d'intégrer les modules solaires de manière optimale aux véhicules électriques.

Intégration des cellules dans la carrosserie

Le style extérieur des automobiles comporte des lignes avec des courbures variables: convexes, concaves ou combinées (vague). Il est dès lors important de connaître le comportement en flexion des cellules solaires en silicium cristallin déjà interconnectées. Une étude spécifique a donc été menée avec des moules aux rayons de courbure fixes afin de définir les zones d'intégration des cellules solaires (figure 3).



Figure 1 Le toit solaire est aujourd'hui disponible et peut être trouvé en option sur les véhicules hybrides produits en série tels que la Hyundai Sonata (à gauche) ou la Toyota Prius (à droite).



Figure 2 Prototypes de start-up orientées vers le marché des véhicules électriques solaires avec la One de Lightyear (à gauche), et la voiture Aptera de la start-up américaine du même nom (à droite).

Fiabilité des panneaux solaires sans verre

Le verre possède un coefficient d'expansion thermique (CET) relativement faible, proche de celui des cellules en silicium. Lorsque le verre est remplacé par un polymère, le CET peut être multiplié par un facteur 10, ce qui induit des contraintes thermomécaniques sur les interconnecteurs métalliques entre les cellules. Les premiers tests montraient une perte de contact électrique après quelques dizaines de cycles thermiques oscillant entre -40°C et $+85^{\circ}\text{C}$. Grâce au développement des matériaux du panneau solaire, les derniers échantillons ne présentent aucune perte de puissance électrique après plus de 1800 cycles thermiques (ce qui équivaut à 8 fois la norme). Actuellement, comme la standardisation des tests pour les modules VIPV n'existe pas

encore, une combinaison des tests utilisés pour le PV, pour l'électronique embarquée et pour les pièces automobiles extérieures est appliquée.

Performance des modules solaires courbés

La mesure standard des performances de cellules et modules PV constitue l'activité principale de Pasan, une filiale de Meyer Burger basée à Neuchâtel. Concernant les modules PV courbés, il existe actuellement un groupe de travail, dont Pasan et le CSEM font partie, qui a pour but de définir une norme équivalente. Cette tâche est cependant difficile et complexe. D'une part, l'irradiance varie en fonction de la distance à la source lumineuse et, d'autre part, l'angle incident de la lumière varie en fonction de la position sur le module. Un outil de simulation précis est donc

nécessaire afin de modéliser la courbe courant-tension lors de la mesure du module PV courbé (figure 4).

Gain en autonomie

L'autonomie solaire des véhicules électriques a été calculée sur la base des performances de divers modules PV courbés et de données météorologiques annuelles typiques, et ce, en fonction de l'orientation des modules et de la localisation géographique [10]. Des conditions optimales ont été utilisées pour le calcul, incluant un stationnement à l'extérieur sans ombrage et une batterie toujours disponible (si la batterie est chargée à pleine capacité, le panneau PV ne pourra pas la recharger).

Les résultats obtenus indiquent que l'autonomie solaire d'un véhicule effieient consommant en moyenne 14 kWh/100 km [11], dont le toit est



Figure 3 Méthode d'évaluation rapide pour déterminer le rayon de courbure minimal des cellules en silicium interconnectées ainsi que les zones pour lesquelles l'intégration de cellules PV dans la carrosserie est possible.

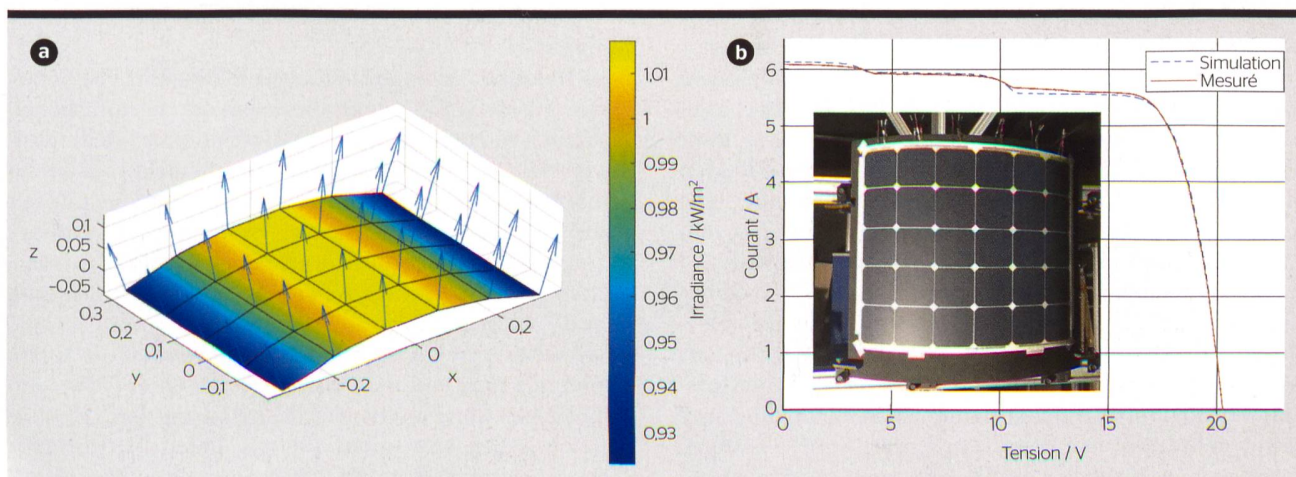


Figure 4 a) Irradiance en fonction de la position sur le module courbé ($R_c = 0,9$ m). b) Mesure courant-tension sous illumination standard et simulation d'un module courbé ($R_c = 0,9$ m, avec diodes bypass).

recouvert de modules solaires d'une puissance nominale totale de 270 W, s'élève à 2000 km par an à Berne, et à 3040 km par an à Séville, en Espagne. Le même véhicule avec toutes les surfaces extérieures recouvertes de modules PV d'une puissance nominale totale de 1260 W (**figure de titre**) bénéficiera d'une autonomie solaire de 7090 km par an à Berne, et de 10360 km par an à Séville. Les 280 kWh produits annuellement par le toit d'une voiture solaire à Berne représentent environ une économie de 110 CHF/an, avec un prix de l'électricité de 40 ct./kWh. Ainsi, sur une durée de vie du véhicule de 10 ans, une somme de 1100 CHF peut être économisée grâce au toit solaire.

PVinMotion

Du 6 au 8 mars 2024 se tiendra à Neuchâtel la conférence internationale PVinMotion, dédiée aux véhicules solaires. Cet événement offrira l'occasion de voir les résultats des projets cités dans cet article et de découvrir les dernières avancées technologiques dans le domaine.

pvinmotion-conference.com

Futurs développements

Les progrès de la technologie solaire permettront d'accroître encore l'autonomie solaire des véhicules électriques: par exemple, les cellules à contact arrière à hétérojonction développées par Meyer Burger peuvent apporter un gain en puissance relatif de 16% par rapport à la technologie actuelle ainsi qu'une esthétique améliorée. Et dans un futur plus lointain, les cellules tandem pérovskite-silicium ajouteront presque 50% de puissance à la solution actuelle.

Références

- [1] H. Ritchie, « Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from? », Our World in Data, 6 octobre 2020. ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport
- [2] « Demand for electric cars is booming, with sales expected to leap 35% this year after a record-breaking 2022 », IEA, 26 avril 2023. [iea.org/news/demand-for-electric-cars-is-booming-with-sales-expected-to-leap-35-this-year-after-a-record-breaking-2022](https://www.iea.org/news/demand-for-electric-cars-is-booming-with-sales-expected-to-leap-35-this-year-after-a-record-breaking-2022)
- [3] « Greenhouse gas emission intensity of electricity generation », European Environment Agency, 12 juin 2023. [eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-13#tab-googlechartid_chart_11](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-13#tab-googlechartid_chart_11)
- [4] M. Wiatros-Motyka, « Global Electricity Review 2023 », Ember, 12 avril 2023. ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023
- [5] « Communication from the commission to the European parliament, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions - EU Solar Energy Strategy », EUR-lex, 18 mai 2022. eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022DC0221

- [6] « Tour de Sol Suisse », Wikipedia. en.wikipedia.org/wiki/Tour_de_Sol
- [7] « World Solar Challenge Australie », Wikipedia. fr.wikipedia.org/wiki/World_Solar_Challenge
- [8] Evannex, « Check Out Tesla Cybertruck's Unique Solar Charging Tonneau Cover », InsideEVs, 2 juillet 2021. insideevs.com/news/517798/tesla-cybertruck-solar-charging-patent
- [9] « Project « PVA » - Photovoltaic Automotive Body », Simoldes, 2022-2023. simoldes.com/en/innovation/pvab-photovoltaic-automotive-body
- [10] « Photovoltaic Geographical Information System », European Commission, last update 2022. re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
- [11] B. Bellois, « Voitures électriques: lesquelles consomment le moins? », L'argus, 21 octobre 2022. [l'argus.fr/actualite-automobile/voitures-electriques-lesquelles-consomment-le-moins-30022697.html](https://actualite-automobile.com/voitures-electriques-lesquelles-consomment-le-moins-30022697.html)

Auteurs

D' **Antonin Faes** est chef de projet R&D dans le groupe Photovoltaïque du CSEM et dirige l'activité Modules photovoltaïques du PV-Lab de l'EPFL.
→ CSEM, 2000 Neuchâtel
→ antonin.faes@csem.ch

Gianluca Cattaneo est chef de projet Fiabilité dans le groupe Photovoltaïque du CSEM.
→ gianluca.cattaneo@csem.ch

Fahradin Mujovi est ingénieur R&D en métrologie et simulations au CSEM.
→ fahradin.mujovi@csem.ch

Matthieu Despeisse est responsable du groupe Solar Modules du CSEM.
→ matthieu.despeisse@csem.ch

Julien Robin est responsable Recherche & Innovation en Allemagne pour Simoldes Plastics et chef de projet du consortium PV Automotive Body.
→ Simoldes Plastics, DE-85716 Unterschleißheim
→ julien.robin@simoldes.com



Solare Mobilität: Traum oder Realität?

Herausforderungen und Lösungen

Angesichts der rasanten Elektrifizierung der Mobilität könnte die Integration von Photovoltaik-Elementen in Fahrzeuge eine Lösung sein, um die Notwendigkeit des Aufladens über das Stromnetz zu verringern. Aber ist die Energiegewinnung wirklich signifikant? Und kann sie verbessert werden? Das SolarBody-Projekt liefert einige Antworten.

Fahrzeuge mit einem PV-Dach sind bereits seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlich. Diese PV-Produkte basieren jedoch auf einer Glaskonstruktion, die sie relativ schwer macht. Ausserdem können diese aus Sicherheitsgründen nur das Dach der Autos abdecken. Es besteht daher eine Nachfrage nach PV-Modulen aus Polymer, die eine fast vollständige Abdeckung der Fahrzeughülle ermöglichen.

Diese Entwicklung steht jedoch vor einigen Herausforderungen. Erstens weisen die Karosserien Linien mit unterschiedlichen Krümmungen auf. Daher ist es wichtig, das Biegeverhalten der bereits miteinander verbundenen kristallinen Siliziumsolarzellen zu untersuchen, um die Bereiche zu definieren, in denen sie integriert werden können. Zweitens kann der thermische Ausdehnungskoeffizient von Polymeren bis zu zehnmal höher sein als der von Siliziumzellen, was zu thermomechanischen Belastungen der me-

tallischen Kontakte zwischen den Zellen führt. Dieses Problem konnte durch die Entwicklung der Solarzellen-Materialien gelöst werden. Schliesslich gibt es noch keine spezifische Norm für die Leistungsmessung von gebogenen PV-Modulen, und die Entwicklung einer solchen Norm ist komplex.

Im Rahmen dieses Projekts wurde die jährliche Solarreichweite eines Fahrzeugs mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 14 kWh/100 km unter optimalen Bedingungen (Parken im Freien ohne Schatten und nicht vollständig geladene Batterie) berechnet. Wenn das Fahrzeug nur mit einem Solardach mit einer Nennleistung von 270 W ausgestattet ist, beträgt sie 2000 km (in Bern). Wenn alle Aussenflächen mit PV-Modulen bedeckt sind (Nennleistung 1260 W), steigt sie auf 7090 km.

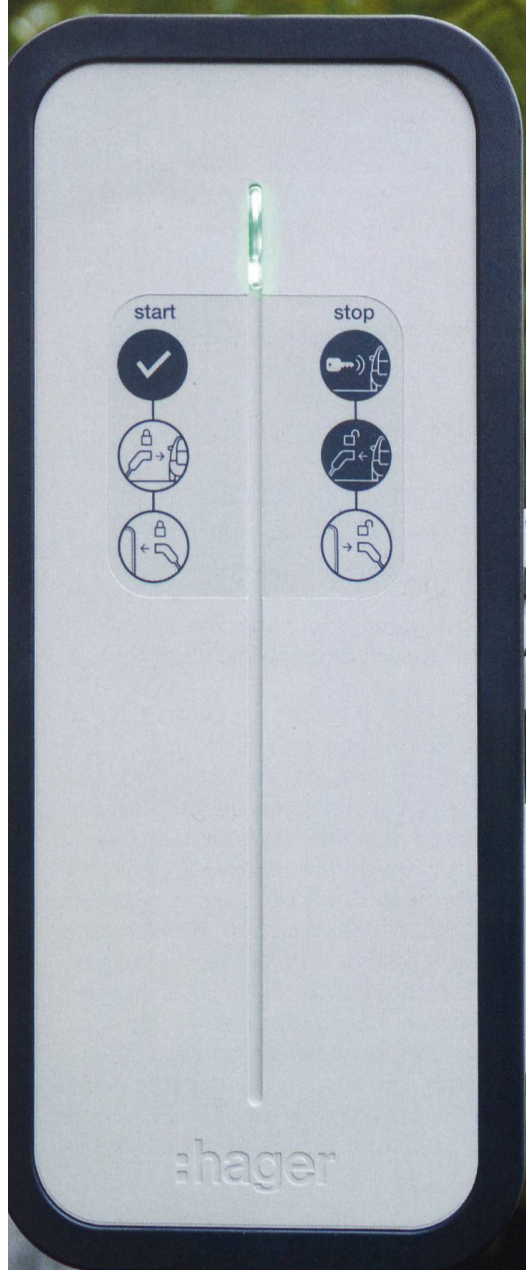
Fortschritte in der Solartechnologie werden die solare Autonomie von Elektrofahrzeugen weiter erhöhen: So können beispielsweise auf der Rückseite kontaktierte Heterojunction-Zellen 16% mehr Energie liefern. In fernerer Zukunft könnte durch die Verwendung von Perowskit-Silizium-Tandemzellen die Energieproduktion um 50% gesteigert werden.

La gamme witty

Solutions de charge sur mesure

Simple, efficace, rapide à installer, fiable: exploitez de nouveaux champs d'activité avec la gamme witty de Hager, les bornes sur mesure pour stations de recharge privées, semi-publiques ou publiques. Idéal pour les maisons individuelles et les immeubles collectifs, les commerces, les services et les pouvoirs publics. witty, c'est l'e-mobilité pour vos clients, et l'énergie pour votre avenir.

hager.ch/witty



:hager