

DE L'ÉLECTRICITÉ SOLAIRE SUR LE TOIT DES VOITURES

À l'époque des pionniers de l'énergie solaire, on essayait déjà d'utiliser l'enveloppe extérieure des voitures électriques pour produire de l'électricité solaire. Malgré de nombreuses tentatives, l'idée ne s'est pas encore imposée à grande échelle. Un projet de recherche romand vient de mettre au point un module photovoltaïque en plastique léger et flexible. L'électricité solaire ainsi autoproduite sur les véhicules pourrait leur permettre de parcourir 1 000 kilomètres supplémentaires par an, voire plus.



Cette Renault Twizy est actuellement équipée au CSEM d'un toit solaire en plastique et d'une batterie développée en interne. Le véhicule sert également à faire la démonstration des technologies développées au CSEM. Ainsi, la voiture électrique solaire a été exposée en novembre 2024 lors du CSEM Business Day 2024 au Kursaal de Berne. Photo: Leonardo Panattoni

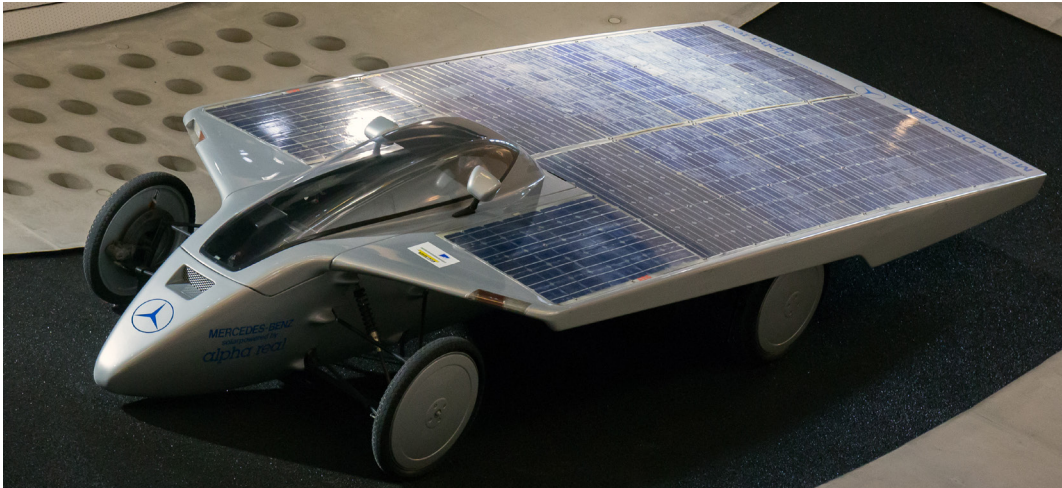


Photo prise à l'époque des pionniers du photovoltaïque intégré aux véhicules: la voiture gagnante du Tour de Sol de 1985 (exposée au musée Mercedes-Benz de Stuttgart). Photo: Morio, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

En 1985, le premier Tour de Sol a été organisé en Suisse. La compétition pour les voitures de course à énergie solaire s'est déroulée en cinq étapes de Romanshorn à Genève. Les véhicules pouvaient utiliser des toits solaires d'une surface maximale de 6 mètres carrés ou d'une puissance de 480 W pour la propulsion. Un véhicule envoyé par Mercedes-Benz et le bureau d'ingénieur suisse alpha real a remporté la victoire.

Le défilé d'ingénieurs solaires inventifs a inspiré les constructeurs automobiles établis, lesquels ont repris l'idée de la propulsion solaire. Audi a présenté sa première voiture dotée d'un toit solaire en 1989. Quatre ans plus tard, l'Audi A8 était équipée d'un toit solaire d'une puissance de 30 watts qui refroidissait la voiture les jours de grande chaleur. En 2010, Toyota a équipé sa Prius d'un toit solaire (53 watts) pour recharger la batterie du véhicule hybride. Depuis, des constructeurs automobiles tels que Toyota, Karma, Hyundai,

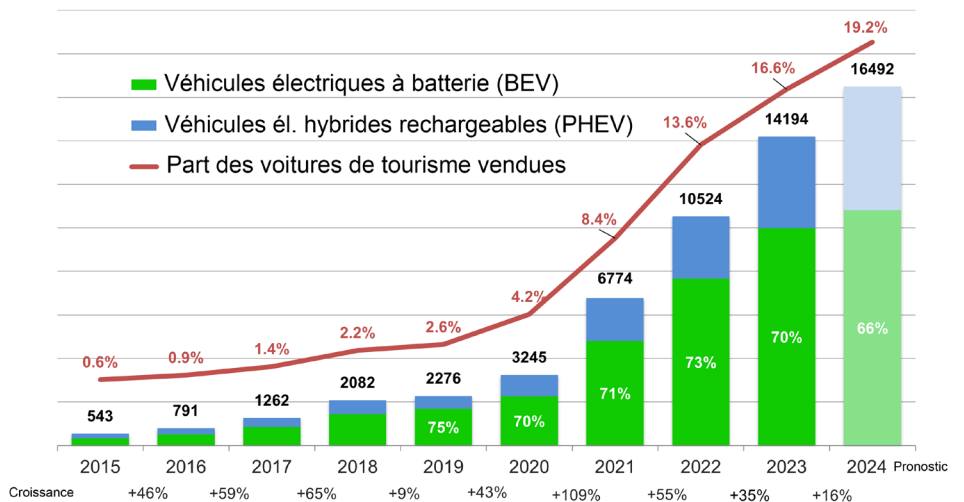
Genesis, Kia et Fisker ont augmenté la puissance de leurs panneaux solaires embarqués. La berline tout-terrain Fisker Ocean a atteint dernièrement une puissance de 270 watts.

Le CSEM mène des recherches pour les fabricants de composants

Le photovoltaïque embarqué (Vehicle Integrated PV/VIPV), c'est-à-dire l'utilisation du photovoltaïque dans les véhicules, a beaucoup progressé au cours des dernières années. Les avantages d'une production d'électricité solaire basée sur des véhicules sont évidents: l'électricité autoproduite augmente l'autonomie, et ce précisément les jours où le temps est ensoleillé pour les excursions et les vacances. En outre, le réseau électrique est soulagé lorsque les voitures électriques recourent moins souvent à une station de recharge.

Malgré tout, l'utilisation de la carrosserie pour produire de

Voitures électriques vendues dans le monde (en milliers)



Le nombre de véhicules électriques vendus dans le monde augmente – et avec lui le potentiel des applications VIPV. Graphique: EV VOLUMES/J.D.Power

l'électricité demeure un phénomène de niche; par exemple, les cellules solaires sont une option payante sur la Toyota Prius ou la Hyundai Ioniq 5. Si la production d'électricité solaire est volontiers utilisée dans les camping-cars, elle est encore loin d'être la norme dans les véhicules électriques. Des entreprises telles que SonoMotors, Lightyear ou Fisker, qui ont misé entièrement sur le VIPV, ne sont pas encore parvenues à s'établir sur le marché avec leurs nouveaux développements. « Concevoir une voiture solaire from scratch – c'est-à-dire à partir de rien – est une entreprise couteuse. Pour aider la VIPV à percer, il serait plus judicieux d'installer des toits solaires de fournisseurs spécialisés dans les modèles de véhicules existants », explique Antonin Faes du centre suisse d'innovation technologique CSEM de Neuchâtel.

Du polymère au lieu du verre

Les toits photovoltaïques pour les voitures proviennent entre autres de fournisseurs tels que a2-solar, AGC, Kaneka, Simoldes Plastics ou Webasto. Depuis 2020, le CSEM coopère avec la société portugaise Simoldes Plastics, qui a développé un toit photovoltaïque pour Stellantis. Parallèlement, le CSEM a travaillé ces trois dernières années sur une nouvelle architecture pour les modules VIPV, en collaboration avec le laboratoire PV de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) à Neuchâtel. Le matériau de support des cellules solaires n'est pas du verre, comme c'était le cas jusqu'à présent, mais du plastique (polymère). Le projet, baptisé SolarBody, est soutenu par l'OFEN et se poursuivra jusqu'en 2025.

SolarBody est dirigé par Antonin Faes. Selon le scientifique du CSEM, le plastique présente plusieurs avantages par rapport au verre: « Les modules en polymère sont moins lourds et présentent une meilleure résistance à la rupture. Ils permettent en outre des applications avec une plus grande richesse de formes et sont plus faciles à fabriquer que les modules en verre ». En collaboration avec des partenaires industriels, le CSEM a participé à plusieurs prototypes de voitures solaires équipées de modules en polymère qui ont démontré la faisabilité et le potentiel des modules en plastique.

Un de ces projets, intitulé « PhotoVoltaic Automotive Body » (PVAB), s'est déroulé de 2020 à 2024 sous la régie de Julien Robin de Simoldes. Outre le CSEM et Simoldes, le centre portugais de développement de produits CEiiA et le groupe automobile Stellantis ont participé. Les partenaires de recherche ont équipé un véhicule électrique de type Citroën AMI, dont l'équipement normal se compose d'un toit vitré (sans PV),



La Citroën AMI, équipée d'un toit solaire en plastique. Photo de: Julien Robin, et al. « PhotoVoltaic Automotive Body (PVAB) Project Outcome of 3 years of VIPV R&D industrial project » in PVinMotion2024, 6-8 March 2024 in Neuchatel



Sur cette Peugeot 508, la lunette arrière a été remplacée par un module en plastique doté de cellules photovoltaïques. Photo de: Julien Robin, et al. « PhotoVoltaic Automotive Body (PVAB) Project Outcome of 3 years of VIPV R&D industrial project » in PVinMotion2024, 6-8 March 2024 in Neuchatel

d'un toit PV en plastique (0,71 m², puissance de 140 W). La construction en plastique est 13% plus légère qu'un module en verre équivalent. Elle assure au véhicule, conçu pour la circulation urbaine, une autonomie supplémentaire pouvant atteindre 8 km par une journée ensoleillée. Sur une année, cela correspond à environ 1 790 km (calculé pour le site de Munich avec une moyenne de 3 515 heures d'ensoleillement par an). Sur 7 000 km parcourus par an, le véhicule urbain pourrait en parcourir environ un quart grâce à l'énergie solaire.

LE POLYMÈRE REMPLACE LE VERRE

Les modules solaires traditionnels sont composés, côté soleil, d'une plaque frontale en verre de 2 à 3 mm d'épaisseur. En dessous, plusieurs couches de plastique sont appliquées, dans lesquelles les cellules solaires sont intégrées. Sur le côté opposé au soleil, le module solaire est recouvert d'un autre film plastique ou d'une deuxième plaque de verre et équipé des connexions nécessaires pour que l'électricité solaire puisse être acheminée vers le réseau.

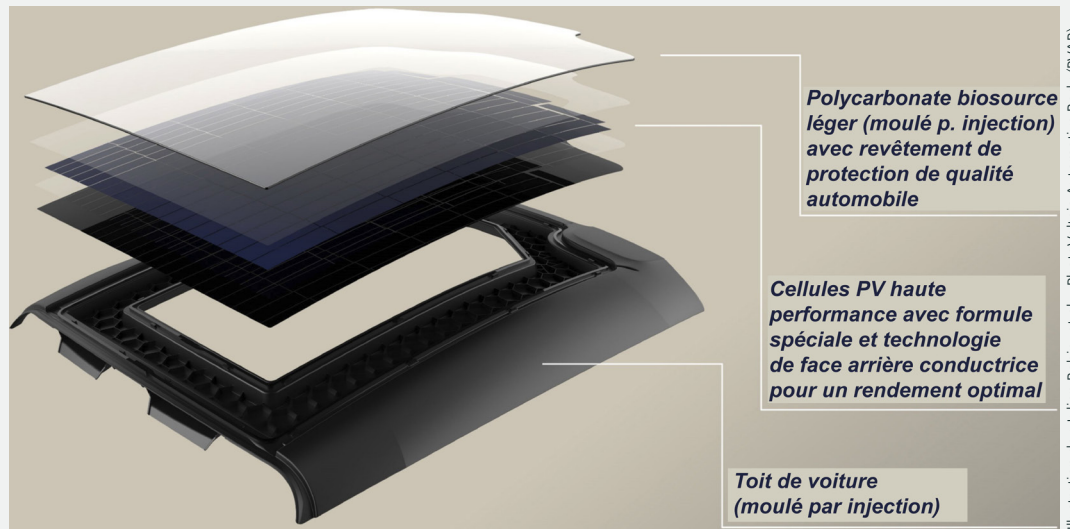


Illustration de : Julien Robin, et al. « Photovoltaic Automotive Body (PVAB) Project Outcome of 3 years of VIPV R&D Industrial project » in PVInMotion2024, 6-8 March 2024 in Neuchâtel

Les modules en plastique ont en principe la même structure – à la différence toutefois que la plaque frontale (et, au choix, la plaque de verre arrière) n'est pas en verre, mais en plastique (polycarbonate). Le polycarbonate est un plastique dur qui peut être fondu plusieurs fois. Ce matériau est utilisé dans l'industrie automobile pour les phares de voiture et comme verre de sécurité (verre blindé, cockpit d'avion, lunettes de protection, etc). Il est également utilisé dans la construction, par exemple pour les serres rigides.

Lors de la production d'un module en plastique, la première étape de production consiste à fabriquer la face avant en polycarbonate par moulage par injection. Pour un toit solaire de voiture, ce panneau a typiquement une épaisseur de 4 mm et mesure 100 x 70 cm. Afin de protéger la pièce en plastique des UV et des rayures, elle est recouverte de deux couches de protection. La fabrication du module solaire suit ensuite les mêmes étapes que pour le toit en verre.

L'un des grands défis de l'utilisation du plastique est qu'il se dilate avec l'augmentation de la température, et ce plus fortement que les cellules solaires ou les contacts métalliques qui y sont intégrés. Dans le pire des cas, cela entraîne des tensions indésirables et, par conséquent, une baisse de la performance des cellules solaires.

Selon la norme CEI 61215, un module PV doit être traité de telle sorte qu'après 200 cycles de test, la perte de puissance ne dépasse pas 5%. Chaque cycle de test reproduit la charge thermique du module sur une période de 24 heures (différence jour/nuit). Les chercheurs du CSEM ont réussi à construire un toit photovoltaïque en polymère dans lequel la valeur de 5% n'était atteinte qu'après 2 300 cycles. Au cours du projet SolarBody, les scientifiques impliqués ont trouvé une structure utilisant des plaques frontales en plastique de polycarbonate. Les modules en plastique doivent désormais prouver leur résistance dans le cadre de tests de longue durée. L'objectif est d'atteindre une durée de vie de 15 à 20 ans.

Des cellules PV sur toute la surface extérieure

Dans le cadre d'un deuxième projet, le CSEM a de nouveau collaboré avec Simoldes Plastics et CEiA, complété plus tard par le laboratoire PV de l'EPFL. Une Peugeot 508 a fait office de véhicule pilote. La lunette arrière a été remplacée par une

pièce transparente en polycarbonate et recouverte de 161 cellules solaires (puissance totale de 100 W) (voir photo p.3 en bas). Les cellules solaires ont été disposées en damier. Cela a permis de garantir une transparence de 50%, comme l'exige la réglementation relative à la lunette arrière.

Pour le même véhicule, on a étudié quelles surfaces, en plus de la lunette arrière, pourraient être recouvertes de cellules solaires supplémentaires. Toutes les surfaces ne dépassant pas le rayon de courbure auquel les cellules solaires se brisent entrent en ligne de compte. Selon les calculs, environ 6 m² de la surface du véhicule (y compris la lunette arrière) se prêtent à l'installation de cellules solaires. Ainsi équipé, le véhicule disposerait d'une puissance solaire de 1 260 W. L'électricité solaire autoproduite permettrait de parcourir 4 800 km supplémentaires par an sur le site de Paris. « L'autonomie solaire » serait environ 2,5 fois plus importante que celle de la Citroën AMI.

Intégration de l'électronique de la batterie

Dans le cadre d'un troisième projet, le CSEM et l'EPFL collaborent sans partenaire industriel. Une Renault Twizy y a été équipée d'un toit solaire en plastique (24 cellules solaires, puissance de 72 W) et d'une batterie. Les deux composants ont été développés par le CSEM. Pour l'équipe de recherche, l'électronique et le contrôle des batteries pour une utilisation optimale de l'électricité solaire sont au centre des préoccupations. Le CSEM a ainsi conçu un système qui vérifie la qualité de chaque cellule de la batterie, ce qui permet d'anticiper la dégradation (le vieillissement) future et d'augmenter la durée de vie de la batterie.

L'accent portait également MPPT (Maximal Power Point Tracker), lequel est connecté entre les cellules photovoltaïques et la batterie et qui sert à régler le point de fonctionnement optimal de l'installation VIPV. Il s'agit d'une tâche exigeante, car le rayonnement solaire change rapidement pendant un trajet (ombre, orientation, etc.). En optimisant le système électronique, l'équipe de recherche a réduit le temps de réaction avec lequel les modifications de l'intensité du rayonnement sont détectées. Au cours de l'année restante, les chercheurs du CSEM et de l'EPFL veulent notamment évaluer les rendements énergétiques réels en effectuant des essais sur route et étudier les performances du système électronique.

Un maximum de soleil pour la voiture

Le rendement réel du VIPV est une question cruciale pour la rentabilité de cette technologie. L'équipe SolarBody base ses calculs sur l'hypothèse optimiste que les véhicules sont toujours garés à l'extérieur dans des endroits ensoleillés lorsque le soleil brille. C'est nécessaire pour obtenir un rendement solaire maximal. Aujourd'hui, les automobilistes essaient géné-



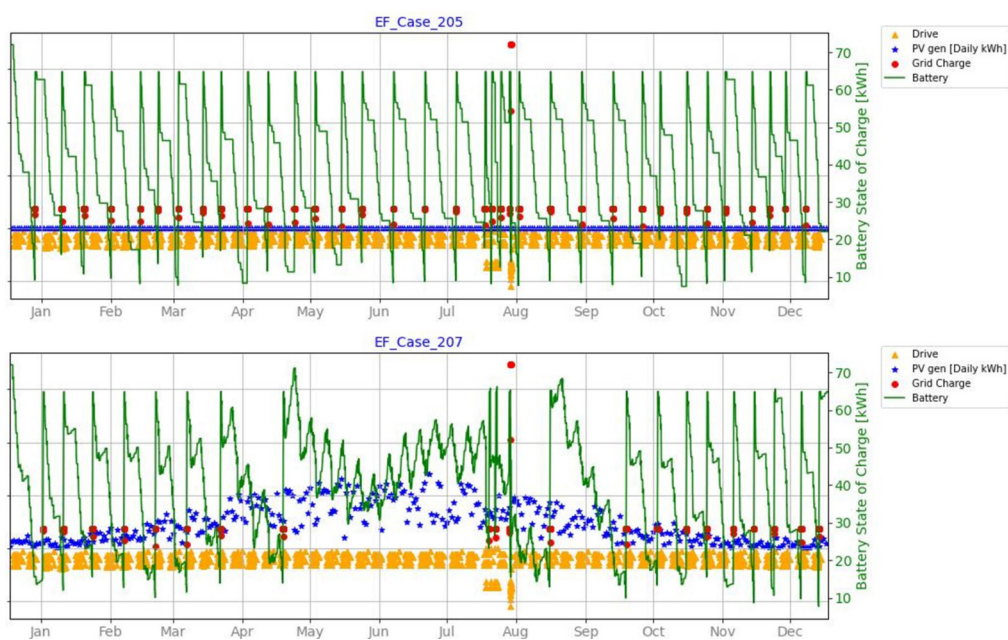
Ils étudient des solutions solaires pour les véhicules: Gianluca Cattaneo (CSEM), Antonin Faes (CSEM), Fahrudin Mujovi (CSEM), Tingyuan Wang (EPFL). Membres de l'équipe de recherche absents sur la photo: Kléber Nicolet-dit-Félix et Mert Turan (EPFL). Photo: CSEM

ralement d'éviter l'exposition au soleil afin de garder l'habitacle frais. « Ce problème pourrait être résolu en refroidissant la voiture juste avant son utilisation à l'aide d'une commande appropriée », propose Antonin Faes comme contre-mesure.

Le chercheur du CSEM voit également dans la VIPV une solution élégante à un problème qui concerne tous les véhicules électriques, mais qui n'est jusqu'à présent que rarement évoqué dans le débat public: le fait que les batteries des voitures électriques en stationnement perdent chaque jour 0,5 à 1%



Les véhicules de livraison de COOP sont aujourd'hui déjà partiellement équipés de toits solaires. Jusqu'à présent, l'énergie solaire était utilisée pour alimenter les batteries des groupes frigorifiques et pour garantir l'alimentation permanente des unités télématiques. Photo: David Lambelet



Une voiture électrique traditionnelle (en haut) comparée à une voiture électrique équipée d'un toit solaire (en bas): Grâce à la production d'électricité propre au véhicule, le nombre de recharges à partir du réseau (paires de points rouges) et donc la charge du réseau peuvent être fortement réduits. Graphique de: Anna Carr, et al. « Solar Moves: Part 1, Modelling the impact of VIPV » in PVinMotion2024, 6-8 March 2024 in Neuchatel

de l'énergie stockée. « Des panneaux solaires sur les voitures seraient un moyen idéal de compenser au moins ces pertes », souligne Faes.

Une évolution dynamique

Les travaux menés notamment dans le cadre du projet SolarBody ont montré que le verre pouvait être remplacé par des polymères durs et inflexibles dans les applications solaires. Il s'agit d'une solution innovante qui se distingue des modules PV semi-flexibles utilisés jusqu'à présent pour les camping-cars ou à coller sur les toits industriels. Ces derniers sont certes dépourvus de verre sur la face avant, mais utilisent un polymère mélangé à des fibres de verre.

Il reste à voir si les solutions solaires pour véhicules développées par le CSEM et l'EPFL trouveront le chemin de l'application commerciale. Le développement de modules PV sans verre ou avec peu de verre est actuellement très dynamique. « Il faut maintenant acquérir de l'expérience avec ces modules d'un nouveau genre avant qu'ils puissent être diffusés comme les modules en verre utilisés jusqu'à présent », explique le chercheur du CSEM Faes.

➤ Le projet de recherche « **SolarBody** – Integration of photovoltaic element for automotive applications » (intégration de modules photovoltaïques dans des applications mobiles) se poursuivra jusqu'en 2025.

➤ Pour tout **renseignement**, veuillez contacter Stefan Oberholzer (stefan.oberholzer@bfe.admin.ch), responsable du programme de recherche Photovoltaïque de l'OFEN.

➤ Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** concernant les projets phares et de recherche, les projets pilotes et de démonstration dans le domaine du photovoltaïque sur www.bfe.admin.ch/ec-photovoltaique.