Revue bimestrielle réalisée avec le concours des membres de la Société des Ingénieurs de l'Automobile

INGÉNIEURS DE L'AUTO

SEPT-OCT 2026 #902

Interview

Christian Kopp, OPmobility
« Concilier compétitivité, vitesse et innovation »

Évènement

L'automobile mondiale a rendez-vous à Paris

Dossier

Éclairer, informer, connecter : le triptyque de la lumière moderne

Focus

DCAS : l'IA progresse, l'humain demeure central

Congrès SIA

Le 38e congrès SIA Powertrain apporte des réponses concrètes aux nouveaux défis de l'automobile mondiale

NeMMo: Closing the Loop: Creating New Tailgates through PP-LGF Recycling

SIA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE

Tous ensemble pour le congrès SIA VISION

Tous les deux ans, la SIA donne rendez-vous, au congrès VISION, à l'ensemble des communautés Éclairage automobile et Aide à la conduite (ADAS).

Ce congrès VISION, c'est toute ma carrière. Depuis ma première participation en 2009, j'y ai découvert les dernières innovations en lien avec l'éclairage et les ADAS, noué de nombreux contacts, retrouvé ces mêmes contacts au fur et à mesure des années. Contacts qui sont devenus des amis.

Voilà le secret de la SIA : ouvrir les portes d'une communauté d'experts et d'amis, où les plus jeunes peuvent apprendre de leurs pairs.

Parfois, l'avenir peut inquiéter, car la crise de l'automobile européenne et française est en effet présente dans tous les esprits. Mais à y regarder de plus près, les secteurs de l'éclairage automobile et des ADAS sont porteurs.

Ces secteurs embauchent, innovent. Il y a une vraie transformation de nos métiers avec l'arrivée de l'IA, l'importance prise par le software embarqué et la possibilité de développer de nouvelles fonctionnalités.

Venir à VISION, c'est découvrir, c'est apprendre, c'est baigner dans un écosystème dynamique qui nous redonne l'envie. C'est la vision que j'ai toujours eue de cet évènement depuis dix-sept ans. Et c'est peut-être encore plus fort aujourd'hui.

Voir le véhicule présidentiel avec son drapeau bleu blanc rouge dans la calandre, fabriqué en France. Voir Valeo qui investit sur son site d'Angers. Voici les bons messages pour notre communauté !

Les maîtres mots de cette édition de VISION sont : technologies, innovations et convivialité. Un triptyque commun à tous les thèmes abordés : Safety, Design, Perception, Human Factor, HMI, E&E Architecture, Réglementations, V2X, Testing, Validation, etc.

Je souhaite à tous un passionnant congrès VISION. Profitez des débats, des présentations, des discussions et des véhicules présents.

Paul-Henri Matha
CEO Driving Vision News.
Ancien Expert Éclairage Volvo Cars et Renault.
Membre de la Communauté d'Experts ADAS de la SIA.

Sommaire

8
Évènement
Mondial 2026 : célébrons l'automobile !

44
Dossier
Les nouvelles dimensions technologiques de l'éclairage

20
Interview
Christian Kopp, OPmobility

« Vitesse, compétitivité et innovation sont essentielles pour continuer à se développer dans ce nouveau paradigme »

6 **Baromètre**
Chiffres clés

8 **Évènement**
Mondial 2026 : célébrons l'automobile !

14 **Focus**
DCAS : quand la conduite automatisée reste sous la responsabilité du conducteur

16 **Écoles**
ESTACA Laval, IFP School, ARECE

18 **Nouveaux Talents**
Iten : la batterie solide de rupture

20 **Interview**
Christian Kopp, directeur des opérations d'OPmobility

24 **L'actu en brèves**

32 **Pleins Feux**
Onduleur de voiture électrique : un domaine d'excellence pour l'industrie européenne

34 **Congrès SIA**
- Le 38e congrès SIA Powertrain apporte des réponses concrètes aux nouveaux défis de l'automobile mondiale
- Powertrain: Renewable Fuels as a Scalable Complement to Vehicle Electrification in Europe: Biomass Availability, Transport Demand and Well-to-Wheel CO_2 Assessment
- NeMMo: Closing the Loop: Creating New Tailgates through PP-LGF Recycling

44 **Dossier**
Les nouvelles dimensions technologiques de l'éclairage

61 **Cahier des entreprises**

Éditeur : Société des Ingénieurs de l'Automobile. 2, rue de Presbourg, 75008 Paris. Tél. : 01.41.44.93.70 © Ingénieurs de l'Auto. **Directeur de la publication :** Jacques Lestideau. **Directrice de la rédaction et coordinatrice :** Catherine Leroy. **Rédacteur en chef :** Christophe Jaussaud. **Rédacteurs :** Bertrand Gay, Yvonnick Gazeau, Vincent Gonin. **Direction artistique et maquette :** Eve Taberna. **Secrétariat de rédaction :** Lila Mars. **Conférence de rédaction :** Christophe Aufrère, Nathalie Bouad, Thierry Bourdon, Luc Bourgeois, Emmanuel Lescaut, Jacques Lestideau, Luc Marbach. **Crédits photos :** ARECE, Audi, Aumovio, BMW, Bosch, CEE-ONU, Cédric Duhez, ESTACA, FORVIA, Genesis, IFP School, Infineon Technologies, Iten, Kia, Marelli, Mercedes, Mondial de l'Auto/Joris Clerc/Martin Cassard, OPmobility, Osram, David Plas, Pöppelmann, SIA, Software République, Stellantis, Valeo, Volkswagen, Volvo, XPeng, ZF (Adobe Stock : 1642679221). **Éditeur Délégué :** Syner'J Media, 30-32, avenue du Général Leclerc, 92100 Boulogne-Billancourt. **Directeur commercial :** David Chatelon : 06.14.86.83.87. **Directrice de publicité et du développement commercial :** Fazia Maghissene : 06.83.77.54.38. **Directrices et directeur de publicité :** Marie-Laure Millard : 06.07.14.29.85. Suzanne Carvalho : 06.60.02.07.67. Bruno Renout : 06.49.54.26.33. **Contacts :** prénom.nom@journalauto.com ou regie@synerjmedia.com **Responsable administration des ventes :** Sandra Huet : 01.75.60.64.76.

Imprimeur : Imprimerie Champagne II, 52200 Langres. N° ISSN 0020-1200. Ce numéro comporte 76 pages.
Origine du papier : Italie. Taux de fibres recyclées : 0 %. Certification : PEFC. Eutrophisation : Ptot 0,006 kg/t.

Diffusion service abonnement. Abonnement avec adhésion SIA : 2, rue de Presbourg, 75008 Paris – info@sia.fr – 01.41.44.93.70.
Abonnement seul : abo@synerjmedia.com – 01.78.16.31.29.

Tarif abonnement 1 an non adhérent. France métropolitaine : 140 euros TTC. Europe : 159 euros HT. Hors d'Europe et DROM-COM : 170 euros HT.
https://boutique.journalauto.com • Tarif au numéro : 27 euros TTC.

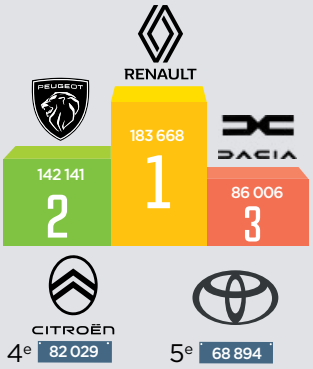
Chiffres clés

AAADATA
Trusted data, useful innovation

Au terme d'un mois d'août en hausse de 7,4 %, le marché français VP affiche une croissance de 3 %, avec 1 078 325 immatriculations après huit mois d'activité. Dans ce contexte, les modèles électriques bondissent de 74,3 %, à 322 099 unités, et s'offrent une part de 29,9 %.

LES TOPS

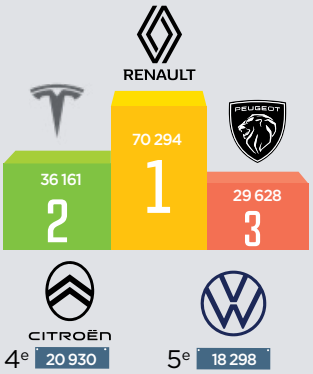
TOP marques VP



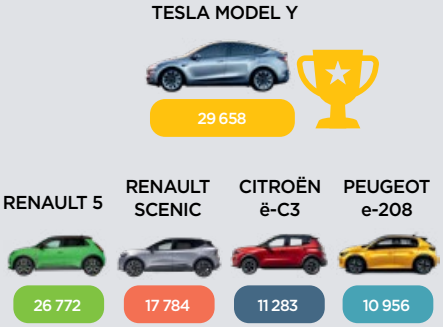
TOP marques électriques

322 099

Après huit mois d'activité en 2026, le marché électrique a totalisé 322 099 immatriculations, en hausse de 74,3 %. La part de marché des VE atteint 29,9 %.

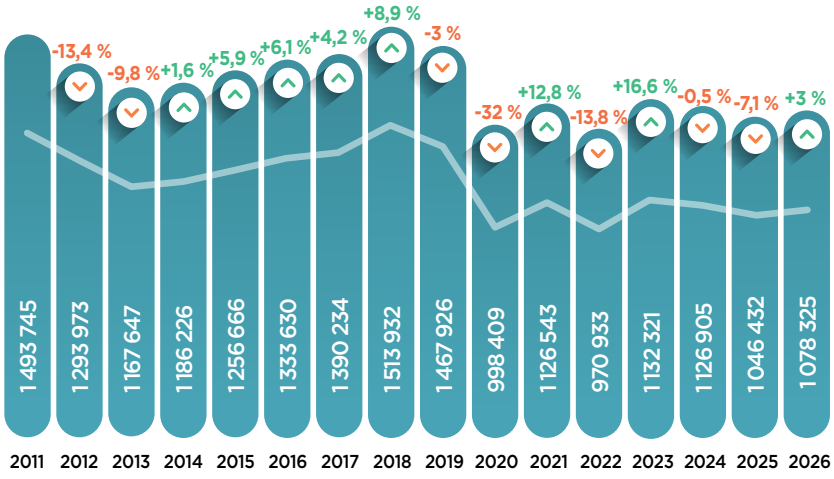


TOP modèles électriques



MARCHÉ VP

Immatriculations à fin août 2026



CARROSSERIE

Sur un marché en hausse de 3 %, les SUV grignotent 6,5 % (575 150 unités). Les berlines gagnent 1,8 % depuis le début de l'année. Elles s'adjugent 41,9 % du marché (451 485 unités).

53,3 %
La part des SUV dans les ventes à fin août 2026

A CITADINES : 3,8 %

3,8 %

B POLYVALENTES : 28,5 %
SUV : 19 %

47,5 %

C COMPACTES : 10 %
SUV : 23,8 %
MPV : 0,2 %

34 %

D FAMILIALES : 2,5 %
SUV : 10,3 %

12,7 %

E GRANDES ROUTIÈRES : 0,3 %
SUV : 0,2 %

0,5 %

F LUXE : 0,03 %
SUV : 0,04 %

0,07 %

K MAJORITAIREMENT VP DÉRIVÉS D'UTILITAIRES : 0,6 %
MPV : 0,5 %

1,1 %

S SPORT : 0,2 %

0,2 %

LES COMMANDES À FIN AOÛT 2026

VP

+8,8 %

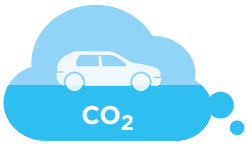
Depuis le début de l'année 2026, le nombre de commandes VP a progressé de 8,8 %, selon les chiffres du CCFA. 1 118 718 bons de commande ont été signés, contre 1 028 226 un an plus tôt. Sur le seul mois d'août, l'augmentation est de 15,8 %.

VUL

-0,3 %

Avec 180 480 signatures au compteur après huit mois d'activité en 2026 (181 004 à fin août 2025), les commandes de VUL ont reculé de 0,3 %. Pour le mois d'août uniquement, elles ont plongé de 18,7 %, à 13 105 unités.

CO_2

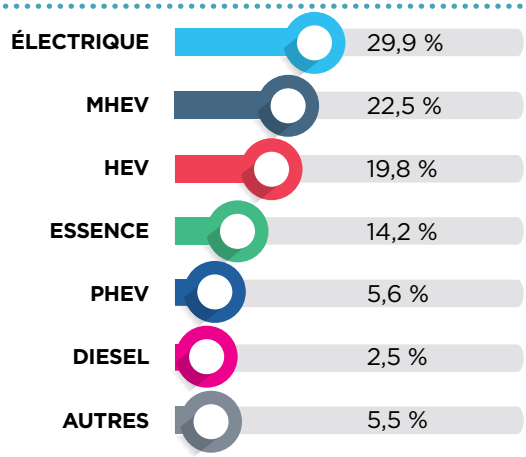


76,7 g/km

En août 2026, la moyenne des VP immatriculés a été de 67,1 g/km. Depuis le début de l'année, la moyenne est de 76,7 g/km, soit 14,8 g/km de moins qu'il y a un an.

ÉNERGIE

Durant les huit premiers mois de 2026, les immatriculations de véhicules électriques ont bondi de 74,3 %, à 322 099 unités (29,9 % de PDM). Les hybrides HEV s'adjugent 19,8 % du marché (214 032 unités ; -5,5 %). Les MHEV (+7,6 %) totalisent 243 031 unités et 22,5 % du marché, alors que les PHEV, avec 60 902 unités (-3,5 %) se limitent à 5,6 % de PDM.



TOP MODÈLES PARTICULIERS/PROFESSIONNELS

(EN UNITÉS VENDUES)

Particuliers

Dacia Sandero — 32 278

Tesla Model Y — 21 639

Peugeot 208 — 20 864

Renault 5 — 20 414

Renault Clio 6 — 20 252

Professionnels

Peugeot 208 — 12 448

Renault Scenic — 12 221

Renault Clio 5 — 10 079

Peugeot 3008 — 8 988

Tesla Model Y — 7 369

VO

TRANSACTIONS TOTALES

À fin août 2026, 3 433 548 véhicules d'occasion (-4,1 %) ont été écoulés en France, dont 1 941 074 entre particuliers.

Particuliers

56,5 %

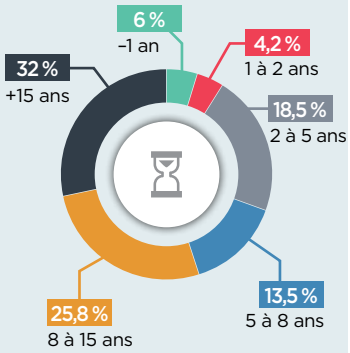
des transactions de VO sur les huit premiers mois de l'année ont été réalisées de particulier à particulier.

Professionnels

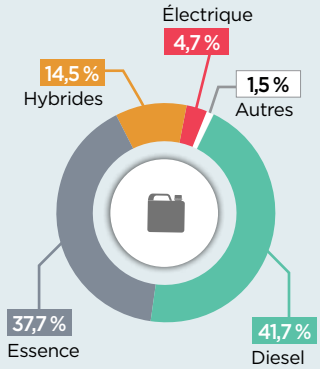
1 492 474

transactions ont été effectuées par des professionnels, soit 43,5 % du volume total.

Par tranche d'âge des véhicules



Par énergie



AGENDA DES FORMATIONS 2026

SUR LES TECHNOLOGIES

La technologie du véhicule électrique Composants et fonctionnement	**10 nov** Paris	**8 et 9 déc** Dist
Fonctions de conduite du véhicule Des ADAS à la mobilité autonome	**17-18 nov** Dist	
Cybersécurité du véhicule connecté	**8 oct** Paris	
L' électronique de Puissance Comprendre pour piloter	**4 nov** Paris	

SUR LES NORMES

L'essentiel de la norme ISO 26262	**6-7 oct** Paris
L'essentiel de la norme ISO/SAE 21434 Cybersécurité automobile	**19-20 nov** Paris

SUR LA QUALITÉ / LA FIABILITÉ

Les outils de la sûreté de fonctionnement Principes et enchaînements	**5-6 nov** Paris
Fiabilité des produits De l'évaluation au plan de validation	**2 au 4 déc** Paris

Pour toute information ou réserver votre place

SIA
07 86 76 12 79 www.sia.fr
larissa.riffaud@sia.fr

La SIA se réserve le droit de modifier ces dates sans condition

Qualiopi processus certifié
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
La certification qualité a été délivrée au titre de la catégorie d'action suivante :
- Actions de formation

Nouvelle formation
Electronique de puissance Comprendre pour piloter

Cette formation s'adresse à des ingénieurs en exercice souhaitant acquérir une vision structurée et opérationnelle de l'électronique de puissance appliquée au véhicule électrique et hybride. En s'appuyant sur un fil conducteur industriel concret — le système iBSG 48V — , elle couvre l'ensemble de la chaîne de valeur technique : des topologies de convertisseurs (en lien avec le fil conducteur) aux contraintes de réalisation industrielle, en passant par le choix des composants et les problématiques de sécurité fonctionnelle. Structurée en cinq modules progressifs et balisés par niveaux de profondeur (Essentiel / Approfondissement / Expert), cette formation propose une immersion pédagogique rigoureuse dans les grands défis de l'électronique de puissance moderne. Cette formation se termine par un jeu de rôle permettant une mise en lumières des arbitrages inter-fonction. L'ensemble repose sur des références académiques et industrielles sourcées (thèses, cours d'ingénierie, publications Techniques de l'Ingénieur), garantissant une base solide et vérifiable.
À l'issue de cette journée, le participant sera en mesure de comprendre, pour challenger les experts en électronique de puissance dans le contexte d'un véhicule électrique ou hybride léger.

Le + de cette formation :

2 mois après la formation, il est proposé aux participants qui le souhaitent un **webinaire de suivi de 2 h00**. Il permet d'expérimenter les acquis, les consolider, d'avoir un temps d'échange sur la mise en application terrain.

Pour découvrir les enjeux et le contenu de cette formation, participez au **webinaire de présentation le 10 octobre 2026, de 13h30 à 14h15**.
Inscription au webinaire à larissa.riffaud@sia.fr.

1ère session le 04 novembre 2026 en présentiel à Paris

Iten : la batterie solide de rupture

Après une dizaine d'années de recherche et développement, Iten, une jeune pousse française, est l'une des rares sociétés dans le monde à proposer des batteries solides. Ces accus, de quelques millimètres, marquent une rupture dans la gestion de l'énergie des composants électroniques.

« *Il y a moins de cinq fabricants de batteries solides dans le monde et nous en faisons partie* », lance Vincent Cobee, directeur général d'Iten. Après une longue carrière dans l'automobile, l'ancien patron de Citroën a pris la direction générale, en décembre 2023, de la société basée à Dardilly, au nord-ouest de Lyon (69). Sa mission ? Faire franchir un cap à l'entreprise. Après avoir été créée fin 2011 par Fabien Gaben, puis avoir enchaîné pas loin de dix ans de recherche et développement, l'heure est à la conquête des marchés. Iten est maintenant capable de fournir des batteries lithium-ion à électrolyte solide rechargeables de quelques millimètres, capables de supporter une communication Bluetooth. Des micro-batteries qui peuvent être intégrées à des composants. « *Il s'agit d'une solution de rupture dans la gestion de l'énergie dans l'électronique* », avance Vincent Cobee.

Une maîtrise complète

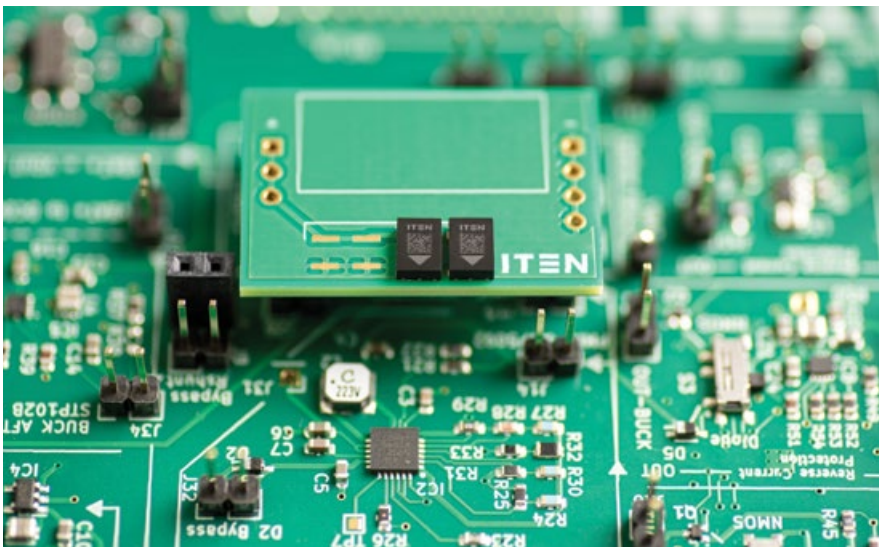
Durant sa phase de recherche et développement, Iten a notamment travaillé avec le CEA, l'Institut de la céramique de Limoges ou encore l'ENS Lyon et l'Université de Bourgogne. Depuis le début de l'aventure, Iten a levé plusieurs fois des fonds, dont 80 millions en 2022 auprès de la BPI, du groupe SEB ainsi que des investisseurs historiques que sont Eren Groupe, Habert Dassault Finances et Innovacom. Une opération également accompagnée de 60 millions d'euros en dette. Au fil des années, et ce n'est pas fini, la société a déposé plus de 300 brevets à travers le monde, dans plus de 48 familles. Les recherches et les innovations d'Iten n'ont pas manqué d'être saluées avec, notamment, l'Électron d'Or, le prix Mongolfier ou encore le French Tech120, à plusieurs reprises. Iten a même reçu le « Best of Innovation Award » lors du CES 2024. La société affirme que ses batteries sont au niveau de l'état de l'art avec une densité énergétique de 600 Wh/l. Mais surtout, le fait qu'elles soient solides, qu'elles ne contiennent pas de matériaux organiques, implique qu'elles ne chauffent pas : un atout pour la sécurité. Autre avantage, elles sont totalement recyclables, intégrables sur des composants électroniques, et soignent la souveraineté.

Vincent Cobee
Directeur général d'Iten depuis décembre 2023.

« *Nous sommes capables de tout faire, de A à Z, de l'oxyde de métaux jusqu'à la fabrication et au test* », explique Vincent Cobee. L'entreprise maîtrise et améliore en continu sa propre chimie. Après une ligne de production pilote en 2018, Iten dispose depuis mars 2024 d'une usine de 1 200 m² avec des salles blanches et sèches, et peut fabriquer jusqu'à 30 millions de batteries par an. Un chiffre qui paraît déjà énorme, mais le directeur général relativise car le marché de la batterie solide dans l'électronique est estimé à 10 milliards d'unités par an. Iten n'a pas vocation à développer sans fin ses capacités de production. « *Nous pouvons être intégrés sur le site de production d'objets connectés ou autres* », précise le directeur général.

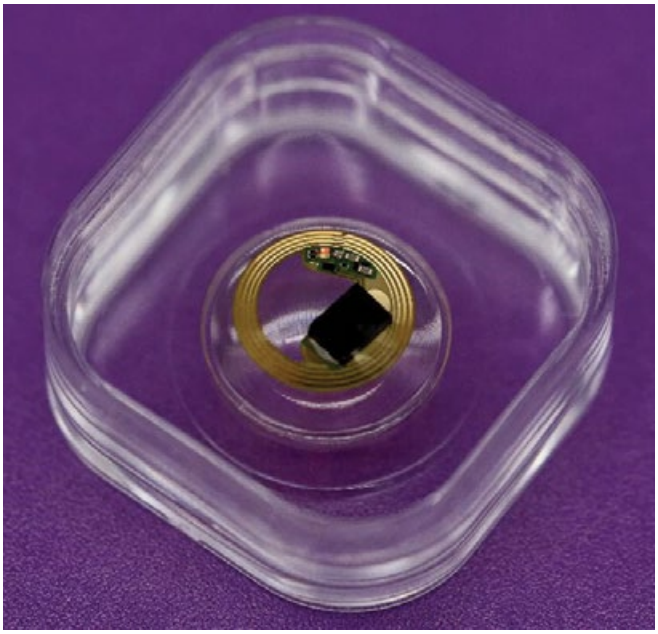
L'explosion des objets connectés

« *Aujourd'hui, le marché est encore dans une phase d'adoption. Certains clients franchissent le pas, alors que d'autres vont demander plus de temps* », constate Vincent Cobee. Dans la course contre la montre dans



Les batteries solides d'Iten peuvent être intégrées à des composants électroniques.

Une batterie solide Powency d'Iten affiche une longueur de 5,1 mm, 3,5 mm de largeur et 1,6 mm d'épaisseur.



Iten va fournir à Xpanceo des batteries pour des lentilles connectées.

l'univers des «chips», «*le stockage de l'énergie et sa gestion deviennent une limite pour les composants électroniques*», pointe Vincent Cobee. Un nouveau chapitre s'est ouvert dans l'électronique avec les objets connectés. «*Il y a vingt ans, ils n'existaient pas,* retrace le directeur général. *Aujourd'hui, il y en a 70 milliards dans le monde. Et cette croissance est loin d'être terminée, c'est une industrie en pleine explosion.*» Aujourd'hui, quasiment tout le monde a des écouteurs associés à son smartphone. «*Ils cachent en général trois batteries et ces dernières représentent 2/3 du volume du produit*», indique Vincent Cobee. Les batteries solides d'Iten pourraient aussi remplacer les piles boutons dans de nombreux appareils.

Une densité énergétique supérieure à 600 Wh/l

Les batteries solides de la société lyonnaise sont notamment composées de couches de céramique poreuse qui renferment des nanoparticules. La céramique est inerte, la porosité permet une interaction plus profonde et pas seulement en surface. Enfin, les nanoparticules permettent d'avoir une surface de contact plus grande avec les matériaux actifs. De quoi limiter la taille et augmenter la densité de puissance. Iten dispose de deux lignes de produits avec Powency et Flowency – cette dernière est encore en développement, mais devrait avoir une capacité de 30 à 400 mAh, pour une densité énergétique supérieure à 600 Wh/l. Powency peut afficher 1,5 mAh, se recharge en 8 min et peut fonctionner sur une large plage de température (-20 à +70 °C). Le tout tenant dans une longueur de 5,1 mm, 3,5 mm de largeur et 1,6 mm d'épaisseur. Mais les choses vont encore évoluer d'ici la fin de l'année et en 2027 avec des batteries plus puissantes (de 5 à 30 mAh) et aux dimensions tout aussi contenues. La 5 mAh mesurera 10 × 10 × 0,8 mm. Celle de 30 mAh aura un encombrement de 20 × 20 × 1,2 mm.

Repousser les limites du stockage de l'énergie

Iten propose donc des batteries de différentes tailles, couvrant de nombreux besoins. Les applications peuvent parfois être atypiques. Ainsi, la jeune pousse a fourni des batteries à une société qui aide à traquer les frelons asiatiques. Pour trouver et détruire le nid, un frelon a été équipé d'un traqueur alimenté par une batterie de 70 milligrammes. Autre application en cours de développement, des batteries vont trouver leur place sur des lentilles de contact connectées. En effet, l'entreprise de Dardilly a signé un contrat de développement avec Xpanceo pour fournir une alimentation de moins de 500 microns d'épaisseur. Les domaines de la défense et du spatial sont aussi des secteurs d'avenir pour les innovations de la société. «*Nous avons un rôle à jouer dans la défense de demain*», affirme Vincent Cobee. On peut notamment penser ici à l'essor des drones ou des robots humanoïdes qui auront besoin d'énergie. Le secteur médical et santé est aussi un levier important. En juillet dernier, Iten a d'ailleurs annoncé que ses systèmes répondaient maintenant à la classe III des implants médicaux. «*Aujourd'hui, le stockage de l'énergie constitue souvent l'un des principaux facteurs limitant leur miniaturisation, leur autonomie et leur durée de vie*», souligne Vincent Cobee. La société a aussi signé avec Baracoda, un spécialiste d'objets connectés liés à la santé. Et l'automobile? «*Ce n'est pas la priorité d'Iten aujourd'hui*», pose le directeur général, même si les applications possibles sont nombreuses.

Poser des fondations solides

«*Nous devons trouver le bon chemin*, confie Vincent Cobee. *Nous avons une quinzaine de clients aujourd'hui, et dans les deux ou trois années à venir, nous voulons poser de solides fondations. Nous allons démontrer notre maîtrise, que l'on parle de fabrication, de qualité ou de fiabilité.*» L'heure n'est pas à la pêche d'un «gros poisson». Il est trop tôt pour approcher un Google ou un Meta, car Iten ne pourrait répondre à une telle demande aujourd'hui. ●

Christophe Jaussaud

Les évènements SIA **2027**

Estelle FORA-PORTHAULT
estelle.fora@sia.fr - +33 6 76 62 24 87

Intelligent Mobility Congress
International Congress
February 3rd-4th 2026, Port Marly, France

Powertrain
International Congress
March 24th-25th, Port Marly, France

Simulation & IA
Congrès
26-27 mai 2026, Senlis, France

NeMMo - SIA x SFIP
International Congress
July 7th-8th, Bretagne, France

Colors Materials & Finishes
International Congress
October 13th-14th 2026, Troyes, France

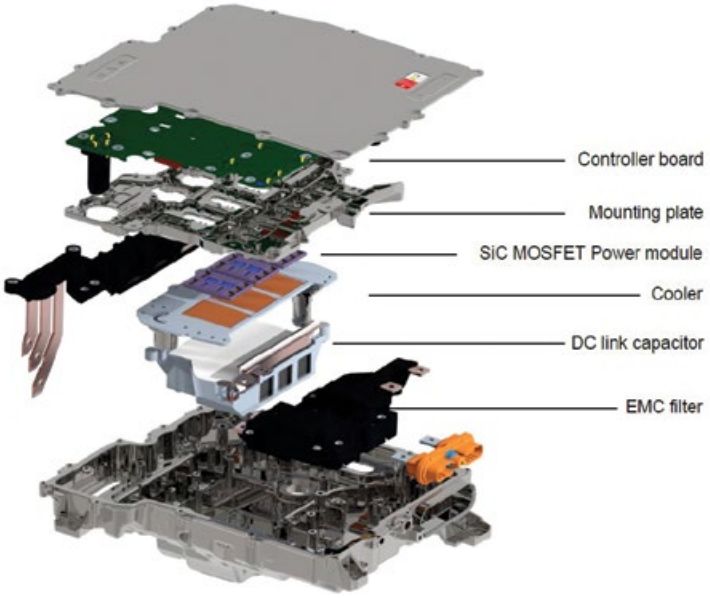
Onduleur de voiture électrique : un domaine d'excellence pour l'industrie européenne

Si la batterie et le moteur électrique captent la majorité de l'attention, l'onduleur joue lui aussi un rôle clé dans le rendement global de la chaîne de traction. Depuis dix ans, il a bénéficié d'évolutions et de progrès majeurs, qui devraient se poursuivre en matière de rendement, de densité de puissance et d'intégration au groupe motopropulseur.

Au cœur de la chaîne de traction, l'onduleur assure la gestion de la puissance entre la batterie et le moteur électrique, principalement en réponse à la consigne du conducteur. En phase de traction, il convertit le courant continu issu de la batterie en courant alternatif triphasé, le plus proche possible d'une forme sinusoïdale. Lors des phases de récupération d'énergie, il assure la conversion inverse afin de réinjecter l'énergie vers la batterie.

Plusieurs axes d'amélioration ont été implémentés et d'autres sont aujourd'hui explorés. L'un des plus structurants concerne l'introduction de semi-conducteurs en carbure de silicium (SiC) en remplacement du silicium (Si). Cette technologie réduit la chute de tension à l'état passant, y compris à haute fréquence, ce résultat étant équivalent à une baisse de résistance dans le circuit. STMicroelectronics estime que les pertes moyennes liées aux commutations sont divisées par 2 lorsque des IGBT Si sont remplacés par des composants SiC, avec un avantage qui s'accroît lorsque le courant traversant diminue. Un onduleur équipé de semi-conducteurs SiC offre ainsi un rendement supérieur d'environ 2 % à forte charge par rapport à une solution au silicium, et jusqu'à 10 % à faible charge. Le coût plus élevé des semi-conducteurs SiC conduit toutefois à rechercher des architectures hybrides associant, dans un même onduleur, composants Si et SiC. Les composants Si prennent alors en charge une part importante du courant, tandis que les SiC, capables de commuter plus rapidement, interviennent dans les phases où les pertes seraient les plus pénalisantes. Infineon Technologies et Stellantis ont testé cette approche sur un onduleur intégrant 30 à 40 % de MOSFET SiC. Ils concluent que, pour des véhicules des segments B et C dotés de batteries de 40 à 75 kWh, la combinaison Si/SiC offre un compromis pertinent entre coût et performance. Au-delà de 75 kWh de capacité batterie, les onduleurs entièrement équipés de MOSFET SiC demeurent en revanche la solution optimale.

Une prochaine étape pourrait être l'adoption de semi-conducteurs en nitrure de gallium (GaN). Ceux-ci permettent des fréquences de commutation encore plus élevées, de l'ordre de 100 à 500 kHz, tout en limitant les pertes associées. Leur diffusion reste toutefois conditionnée à une baisse de coût et à une augmentation de leur capacité de courant. Le CEA a déjà atteint un rendement de 99 % sur un prototype d'onduleur commutant à 100 kHz.

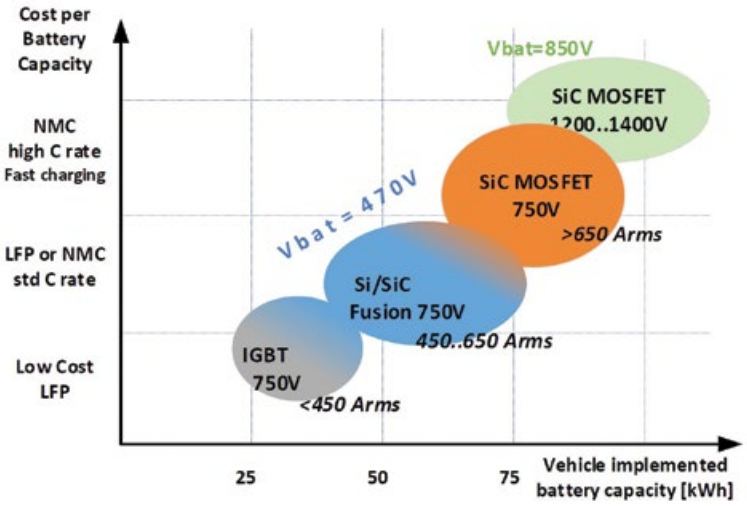


Nouvel onduleur Volkswagen APP350 utilisé sur la plateforme MEB.

Fréquences variables et multi-niveau

Afin d'alimenter le stator par un courant triphasé sinusoïdal, les semi-conducteurs commutent généralement à une fréquence maximale de 5 ou 10 kHz. Cette valeur dépend notamment du régime de rotation et du nombre de pôles du moteur. La sinusoïde obtenue reste imparfaite, ce qui pénalise le rendement de la machine électrique. Augmenter la fréquence de commutation, jusqu'à 20 kHz voire 50 kHz, permet d'améliorer la qualité de la sinusoïde, mais au prix de pertes accrues dans l'onduleur. L'enjeu consiste donc à déterminer le meilleur compromis entre onduleur et moteur.

Une solution, déjà présente sur certains onduleurs, consiste à faire



Choix Si/SiC en fonction de la capacité et du coût de la batterie selon l'étude menée par Infineon Technologies et Stellantis.

varier la fréquence de commutation selon les conditions de vitesse et de charge, en l'associant à différents modes de modulation. Cette flexibilité permet d'optimiser l'équilibre entre rendement, contraintes de compatibilité électromagnétique (CEM) et dynamique du système. Elle s'accompagne toutefois d'une complexité accrue dans le pilotage de la tension et la conception du filtrage CEM.

La grande majorité des véhicules électriques utilise aujourd'hui des onduleurs à modulation deux niveaux de tension : maxi et nulle. Une modulation trois niveaux – maxi, moitié et nulle – permet de s'approcher davantage d'une sinusoïde idéale. La qualité du courant s'en trouve améliorée et les coupures de tension moitié moindres réduisent les pertes dans les IGBT ou diodes. Ces deux effets contribuent à améliorer le rendement de l'onduleur. En contrepartie, cette architecture augmente le coût et l'encombrement.

Prochaine étape : le refroidissement direct

La miniaturisation continue des composants électroniques réduit la masse et l'encombrement des onduleurs, ce qui facilite leur intégration physique à la machine électrique. Leur densité volumique a ainsi triplé en quinze ans : d'environ 10 kW/l sur les véhicules hybrides des années 2010, elle atteint aujourd'hui près de 30 kW/l sur les véhicules électriques européens. Certains modèles premium européens atteignent même 35 à 40 kW/l.

Les onduleurs sont le plus souvent refroidis par une circulation d'eau qui extrait la chaleur depuis une seule face du support des semi-conducteurs. Mais l'augmentation de la densité volumique concentre davantage de chaleur dans un volume réduit, imposant une évolution importante des dispositifs thermiques. Les onduleurs de 35 à 40 kW/l cités précédemment recourent ainsi à un refroidissement double face : le support des semi-conducteurs est pris en sandwich entre deux plaques froides traversées par de l'eau.

Les plaques froides atteignent toutefois leurs limites. La chaleur doit traverser plusieurs interfaces et matériaux avant d'atteindre le circuit d'eau, ce qui limite l'efficacité du refroidissement lors des fortes demandes de puissance. En outre, ces plaques ne permettent pas de refroidir l'ensemble des composants, notamment les condensateurs et les busbars. Une réponse possible pourrait être le refroidissement par immersion, aussi appelé refroidissement direct, qui consiste à plonger les composants dans un liquide diélectrique chargé d'évacuer la chaleur. L'utilisation de l'huile de la machine électrique comme fluide caloporteur simplifie le circuit de refroidissement direct de l'onduleur et favorise l'intégration des deux sous-systèmes. Outre ses fonctions de lubrification et de refroidissement du moteur électrique, l'huile doit présenter des propriétés spécifiques, en particulier diélectriques et thermophysiques. Ces caractéristiques doivent rester stables malgré le vieillissement, l'oxydation, la contamination et la présence d'additifs.

L'IFPEN et TotalEnergies ont mené une étude dans ce sens sur un onduleur de 200 kW. Les essais réalisés sur une maquette dédiée ont montré que les formulations d'huile proposées conservaient leur robustesse thermique et électrique, une filtration en ligne étant nécessaire pour limiter l'impact des particules. Le refroidissement direct a permis une intégration compacte, avec un rendement de 98,7 % à 175 kW sous 750 V. Les gains thermiques apparaissent modérés au niveau des jonctions des MOSFET encapsulés, mais importants sur les busbars et les condensateurs.

Ces progrès majeurs sont constatés sur des produits européens, qui ne souffrent d'aucun retard vis-à-vis des concurrents chinois et américains. Le rendement des onduleurs peut désormais dépasser 96 % sur l'ensemble d'un cycle WLTC et atteindre 99 % sur certains points de fonctionnement. Alors qu'elle était initialement inférieure à 1,5 kW/kg, leur densité de puissance devrait rapidement atteindre 3 kW/kg, voire approcher 4 kW/kg pour les produits les plus optimisés.

Yvonnick Gazeau

Onduleur refroidi par immersion étudié par l'IFPEN et TotalEnergies.

Exposez lors de nos congrès !

Saisissez l'opportunité de présenter vos services et solutions à un public d'ingénieurs de haut niveau.

Vos opportunités

- Stand d'exposition
- Voiture de démonstration
- Visibilité digitale

Contact

Estelle FORA-PORTHAULT
estelle.fora@sia.fr

www.sia.fr
Rubrique "Evènements"