

INGÉNIEURS DE L'AUTO

MAI/JUIN 2024 # 889

L'Interview

**Ricardo face
aux défis
de l'électrification**

Dossier

La perpétuelle évolution des chimies de batteries

Pleins Feux

**L'enjeu de la
cybersécurité**

Pour garantir un avenir durable des transports à travers le monde, plusieurs défis sont à relever.

Nous devons bien sûr répondre à l'énorme hausse du besoin en batteries pour les véhicules électriques. Pour autant, il apparaît pertinent de développer des chaînes de traction alternatives ou des carburants neutres en carbone pour certains usages intensifs qui restent difficiles à électrifier. Le choix d'une chaîne de traction pour chaque type d'application pourrait ainsi s'appuyer sur une analyse de son cycle de vie, et sur une estimation de son coût total de possession.

Si le basculement au tout électrique est prévu en Europe en 2035, il reste encore de nombreuses incertitudes, par exemple sur son acceptabilité économique, sur le temps que prendra la transition dans le monde, ou encore sur les conséquences de la consommation électrique si 100 % des voitures vendues étaient électriques. L'encadrement réglementaire concernant l'usage de ces nouvelles technologies de propulsion devrait ainsi faire davantage l'objet de concertations et d'arbitrages afin d'accompagner cette transition tout en maintenant la compétitivité de notre industrie automobile.

Au sein de la SIA, notre Communauté des Experts des Technologies des Chaînes de Traction est engagée dans une dynamique consistant à mener des réflexions sur tous les aspects liés aux nouvelles mobilités. Nous organisons également des journées d'études ainsi qu'un congrès annuel. Les deux journées d'études de cette année, organisées le 21 mars sur les batteries et le 16 mai sur les moteurs à combustion à hydrogène, ont été couronnées d'un grand succès.

Le prochain congrès Powertrain, qui se tiendra les 19 et 20 juin 2024 à Lille, traitera de tous les sujets techniques et scientifiques en rapport avec l'ensemble de la propulsion automobile, y compris l'énergie associée, afin de prendre en compte les changements d'orientation en cours. Ces sujets seront largement abordés lors des présentations que nous avons sélectionnées, ainsi que dans les sessions plénières et tables rondes.

Au-delà des aspects techniques, nous menons également des réflexions sur les moyens à déployer pour maintenir l'attractivité des métiers d'ingénieurs dans l'automobile et permettre à tous les acteurs publics et privés de la formation d'apporter des réponses aux enjeux de cette transition. La SIA a publié un Livre blanc sur les besoins de la filière en nouvelles compétences et métiers à court, moyen et long terme. Celui-ci a mis en évidence la nécessité de transformer les métiers actuels et de développer de nouvelles compétences. Pour rendre notre filière plus attractive, il importe de créer des formations et cursus innovants, afin de garantir durablement la compétitivité de notre écosystème industriel.

Bonne lecture.

Noureddine Guerrassi

Président de la Communauté
des Experts des Technologies
des Chaînes de Traction



Sommaire



26

Pleins Feux

Les enjeux de cybersécurité
avec l'UN R155
et l'ISO/SAE 21434

34

Le Dossier

La perpétuelle évolution
des chimies de batteries



14

L'Interview

Jason Oms O'Donnell, Ricardo

"La gestion thermique de la batterie
est un domaine majeur"



8 Focus

Les nouvelles réglementations à venir

10 Nouveaux talents

TwinswHeel : des droïdes
pour repenser la logistique

12 Une école, des projets

À l'Icam Toulouse, un enseignement
au plus près des besoins des entreprises

14 L'Interview

Jason Oms O'Donnell,
directeur général de Ricardo

18 L'actu en brèves

26 Pleins feux

Les enjeux de cybersécurité
avec l'UN R155 et l'ISO/SAE 21434

30 Journée d'étude SIA

- Les moteurs à combustion d'hydrogène
hautes performances

34 Le Dossier

L'évolution perpétuelle de la chimie
des batteries pour véhicules électriques

55 Le cahier des entreprises

Éditeur : Société des Ingénieurs de l'Automobile. Immeuble "le Gabriel Voisin" - 79 rue Jean-Jacques Rousseau - 92158 Suresnes Cedex. T. : 01.41.44.93.70 - F. : 01.41.44.93.79. ©Ingénieurs de l'Auto. **Directeur de la publication :** Frédéric Charon. **Directrice de la rédaction et coordinatrice :** Catherine Leroy. **Rédacteur en chef :** Christophe Jaussaud. **Rédacteurs :** Bertrand Gay, Yvonnick Gazeau, Vincent Gonin. **Directrice artistique et maquette :** Eve Taberna. **Secrétariat de rédaction :** Lila Mars. **Conférence de rédaction :** Nathalie Bouad, Thierry Bourdon, Luc Bourgeois, Jacques Graizon, Nouredine Guerrassi, Bertrand Largy, Emmanuel Lescaut, Luc Marbach, Frédéric Martin. **Crédits photos :** Analog Devices, AVL, BMW, Bosch, BYD, FEV Group, HiNa Battery Technology, Icam Toulouse, IEA, MAN, Marelli, Mercedes, Nature Energy, NIMS, OEB, Plus, Renault, Ricardo, SIA, Stellantis/Julien Cresp, TotalEnergies, Volkswagen. AdobeStock (709454326, 430034772, 597100281, 766325026). iStock (1437406220, 1465150442, 1482911984, 2107894331). **Éditeur Délégué :** Syner J Media, 9-9 bis rue Henri Martin, 92100 Boulogne-Billancourt. **Directeur commercial :** David Chatelon T. : 01.75.60.64.75. **Directrice de publicité et du développement commercial :** Fazia Maghissene T. : 01.75.60.64.79. **Directrices et directeur de publicité :** Marie-Laure André T. : 01.75.60.28.60. Suzanne Carvalho T. : 01.75.60.40.62. Bruno Renout T. : 01.84.19.02.89. **Responsable administration des ventes :** Sandra Huet T. : 01.75.60.64.76.

Imprimeur : Imprimerie Champagne II, 52200 Langres. N°ISSN 0020-1200. Ce numéro comporte 84 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 : 79 rue Jean-Jacques Rousseau - 92 158 Suresnes Cedex - 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.





LES FORMATIONS SIA 2024



FORMATIONS TECHNIQUES

La technologie du véhicule électrique

Composants et fonctionnement

18 juin
Présentiel

7-8 nov.
Distanciel

3 déc.
Présentiel

Fonctions de conduite du véhicule

Des ADAS à la mobilité autonome

19-20 nov.
Distanciel

NEW

Cybersécurité du véhicule connecté

18 sept.
Présentiel

17 déc.
Présentiel

La cybersécurité est devenue un enjeu majeur pour les véhicules connectés. Cette formation vous permettra d'identifier la surface d'attaque des véhicules et les menaces associées à leur architecture électrique électronique. Les techniques de sécurisation au niveau véhicule, composant et serveur débarqué seront abordés pour vous permettre de contribuer à la chaîne de confiance du véhicule connecté.



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



LES NORMES

L'essentiel de la norme ISO 26262

4-5 juin
Présentiel

26-27 nov.
Présentiel

NEW

L'essentiel de la norme ISO/SAE 21434

Cybersécurité automobile

24-25 sept.
Présentiel

10-11 déc.
Présentiel

Une norme de cybersécurité pour le produit qui est la référence mondiale reconnue et utilisée par tout l'écosystème automobile. La compréhension de l'ISO/SAE 21434 est une nécessité absolue pour concevoir, développer, industrialiser et superviser les produits et les systèmes destinés aux véhicules et à leurs serveurs embarqués. L'intégration des processus issus de cette norme est un attendu important pour toute entreprise qui fournit des solutions électroniques, réseau ou logicielles en vue de leur intégration dans un système automobile. Cette formation est une étape importante permettant d'intégrer la cybersécurité dans vos processus internes et de démontrer votre conformité à vos clients et partenaires.



LA QUALITÉ / LA FIABILITÉ

Les outils de la sûreté de fonctionnement

Principes et enchaînements

11-12 juin
Présentiel

21-22 nov.
Présentiel

Fiabilité des produits

De l'évaluation au plan
de validation

1-2-3 juil.
Présentiel

4-5-6 déc.
Présentiel



La certification qualité a été délivrée au
titre de la catégorie d'action suivante :
- Actions de formation

Avec le support de :



Les enjeux de cybersécurité avec l'UN R155 et l'ISO/SAE 21434

La norme ISO/SAE 21434 impose aux constructeurs de veiller à la qualité de la communication entre le véhicule et son environnement, en s'assurant de sa protection cyber. Au-delà de l'homologation, cette norme s'étend au dernier véhicule en circulation. Plus globalement, la cybersécurité devient un enjeu majeur, du fait de la surface d'attaque qu'offrent les véhicules, et de par la responsabilité juridique qui incombe aux constructeurs.

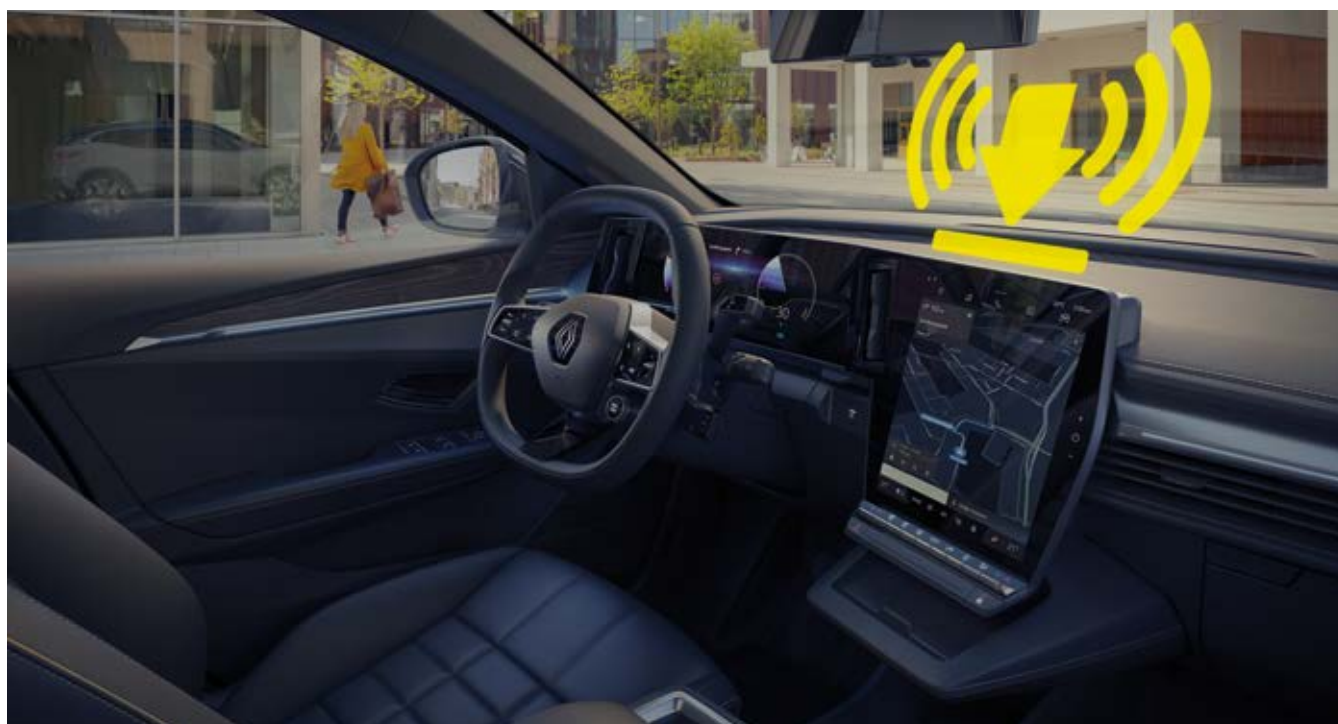
L'année 2024 est cruciale pour la cybersécurité dans les véhicules. Le règlement de l'ONU n° 155 (UN R155), entré en vigueur en juillet 2022, ne concernait que les nouveaux types homologués. Dès juillet 2024, il s'appliquera à tous les véhicules neufs vendus sur le marché européen. Ce règlement, l'une des briques du package GSR2, assure la qualité des systèmes de cyber-protection nécessaires. Plus largement, ces derniers sont devenus incontournables avec l'accroissement actuel du nombre de canaux de communication entre la voiture et son environnement (e-call, téléphonie, diagnostic à distance, téléchargement de mises à jour, connexion avec les réseaux de recharge d'électricité) qui aboutit à une expansion considérable de la surface d'attaque.

Les experts du sujet distinguent, face à cette problématique cyber, trois familles de constructeurs et d'équipementiers :

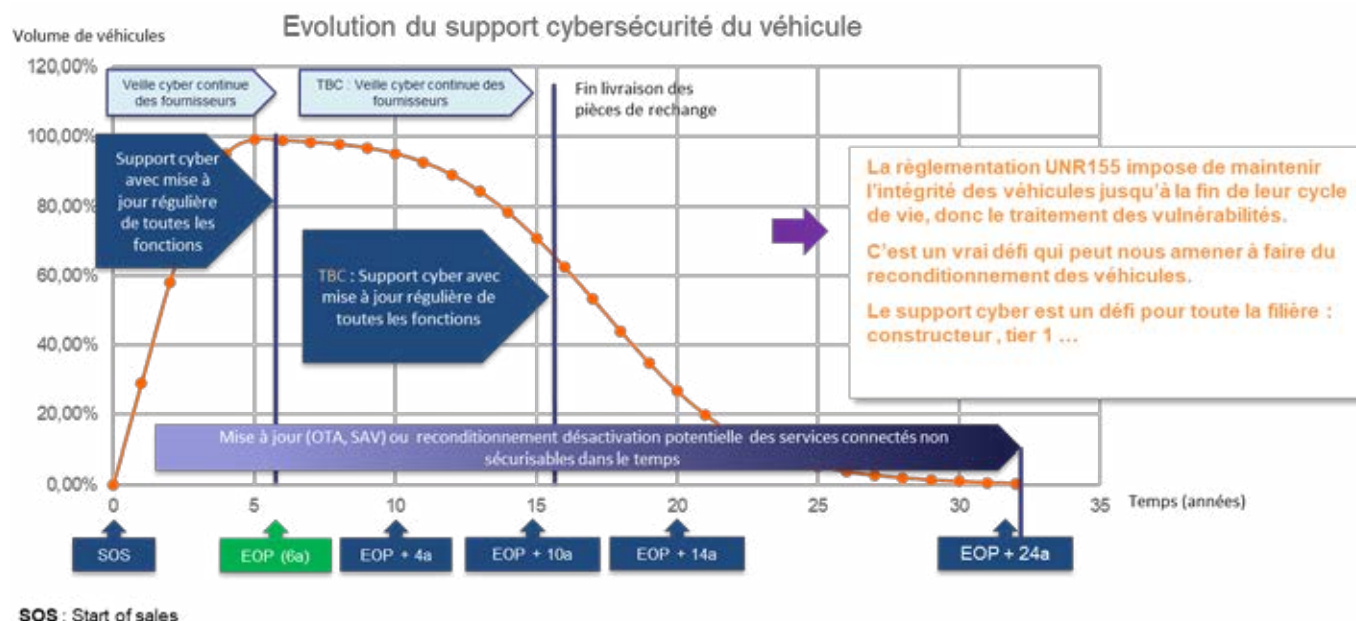
les constructeurs européens historiques et leurs équipementiers, qui sont entièrement prêts ; les nouveaux arrivants asiatiques, qui s'y mettent avec divers degrés de maturation ; et enfin, les acteurs des véhicules industriels et des bus.

Les objectifs de la norme ISO/SAE 21434

Le règlement UN R155 définit les exigences réglementaires, et stipule notamment la responsabilité des constructeurs dans le domaine de la cybersécurité. Il leur impose de maintenir l'intégrité des véhicules jusqu'à leur fin de vie. Il s'agit là d'un véritable défi pour les constructeurs, dont les obligations dans le temps ne concernaient jusqu'à présent que la livraison des pièces de rechange dix ans après la fin de la production du type considéré. Désormais, les constructeurs



Un véhicule cybersécurisé jusqu'à sa fin de vie : une exigence réglementaire



doivent être capables d'assurer un support cyber pour les fonctions qui le nécessitent et lors des interactions (mises à jour OTA ou interventions en après-vente) jusqu'à la fin de vie du véhicule. La norme ISO/SAE 21434 a pour but de fournir un processus garantissant la stabilité des performances des systèmes exigeant une protection cyber. Cette norme couvre, comme demandé par l'UN R155, toutes les étapes de vie d'un véhicule, de sa conception jusqu'à son retrait de la circulation; elle s'applique à tous les systèmes électroniques embarqués, ainsi qu'à ceux pouvant être connectés au véhicule. Pour cela, l'ISO/SAE 21434 évalue les risques potentiels et entend protéger les véhicules contre tous les types de cyberattaques. Cette norme comporte quatre parties principales : l'évaluation et la gestion des risques ; les contrôles de sécurité ; la communication et l'échange d'informations ; les stratégies d'atténuation.

• Évaluation et gestion des risques.

L'ISO/SAE 21434 demande une évaluation et une gestion des risques pour les systèmes des véhicules. Cela comprend l'identification, l'évaluation et la gestion des risques de cybersécurité. Les constructeurs doivent également instaurer un plan pour faire face aux cyberincidents.

• Contrôles de sécurité.

La norme impose de mettre en place des contrôles de sécurité pour protéger les véhicules contre les cyberattaques. Ces contrôles incluent des éléments tels que l'authentification, l'autorisation et le chiffrement.

• Communication et échange d'informations.

L'ISO/SAE 21434 oblige les organisations à échanger des informations sur les risques et incidents de cybersécurité. Cela comprend le partage d'informations avec les fournisseurs, les clients et les autres parties prenantes.

• Stratégies d'atténuation.

L'ISO/SAE 21434 exige la mise en place de stratégies d'atténuation pour faire face aux cyberincidents. Celles-ci doivent être conçues de façon à minimiser l'impact d'un incident sur les systèmes du véhicule.

Des outils pour répondre aux menaces cyber

Ces sujets de communication et de sécurisation des données ont amené dans le secteur automobile de nouveaux acteurs, provenant du monde de l'informatique et de l'IT, qui proposent de nombreuses solutions. Comme le résume Yacine Ladjici, Group Cybersecurity Officer de la division Valeo Power, «il est important de trouver une solution qui soit à la fois robuste, efficace et budgétairement acceptable». Sur ce dernier point, certaines solutions nécessitent de conséquentes adaptations ou des architectures qui n'étaient pas courantes dans l'automobile (serveurs débarqués, par exemple).

Plus le véhicule fait appel à des fonctionnalités présentes dans des serveurs débarqués, plus le besoin de sécurisation est grand. «Le boîtier télématique assurant les liaisons avec l'extérieur est l'un des composants qui demande le plus d'efforts pour être sécurisé», précise Yacine Ladjici. Cela concerne des flux de données classiques mais également, à moyen terme, le volet financier d'une recharge de véhicule électrique sans badge ni moyen de paiement. Dans ce cas, le véhicule se connecte avec son identité numérique, il est reconnu et la facturation est attribuée au propriétaire du véhicule. L'innovation repose alors sur l'usage de nouveaux protocoles cryptographiques pour assurer le meilleur niveau de protection des données clients et bancaires qui vont transiter par la borne.

Les compétences acquises ces dernières années dans le domaine de la cryptographie par les équipementiers leur permettent de développer ces systèmes sécurisés sans avoir à faire appel à de nouveaux acteurs. Plus largement, l'enjeu majeur est celui de la sécurisation de véhicules équipés d'un même calculateur, mais dont les logiciels ne sont pas forcément rigoureusement identiques. Cela complique la protection et pour améliorer celle-ci, il faut savoir capter et interpréter tous types de signaux, techniques et provenant

du véhicule, ou des signaux faibles d'informations échangés par certains sur des forums. « Il est crucial d'agir avant qu'une entité malveillante puisse exploiter une vulnérabilité pour mener une attaque contre un véhicule », souligne Yacine Ladjici. Le défi réside dans la réponse que le constructeur et ses fournisseurs peuvent opposer à une menace visant les véhicules déjà commercialisés. Ces derniers sont donc concernés au même titre que des téléphones mobiles ou des systèmes informatiques, mais avec des impératifs de sûreté de fonctionnement évidemment tout autres.

« Pour des attaquants dotés d'une bonne fibre technique, l'automobile est un produit très attractif », ajoute Yacine Ladjici. Les attaques peuvent venir de « white hats », motivés par le défi technique, ou de « black hats » qui ont des visées malveillantes. Les deux cas de figure demandent des contre-mesures. L'agilité cryptographique y joue un rôle important, et les nouvelles technologies de cryptographie quantique et post-quantique doivent être utilisées par une meilleure protection des clés de chiffrement. Par ailleurs, le groupe de travail cybersécurité de la PFA a proposé que les véhicules L6 et L7 soient également concernés par l'UN R155. Le dossier porté par le CNRV auprès des Nations Unies pourrait faire l'objet d'une décision positive au cours de ce mois de juin 2024 ; ainsi, les L6 et L7 relèveraient de ce règlement et non du Cybersecurity Resilience Act, plus généraliste.

Aller plus loin avec le CAL et le TAF

Les travaux de l'ISO sur le sujet ne s'arrêtent pas là. Les experts en cybersécurité de la filière automobile française ne relâchent pas leurs efforts, notamment sur deux domaines

additionnels que sont le CAL et le TAF. Le Cybersecurity-Assurance Level (CAL) a l'objectif d'améliorer la sécurité fonctionnelle des systèmes. Le Target Attack Feasibility (TAF) doit quantifier le niveau de défi qui va être associé au contrôle d'accès d'un système.

« Plus de 650 propositions ont été formulées à l'ISO concernant le CAL et le TAF, et un grand nombre d'entre elles proviennent de Renault Group, de Stellantis et de leurs équipementiers », précise Yacine Ladjici, qui préside également le groupe de travail cybersécurité de la PFA. La réunion qui s'est tenue en mai dernier à Stuttgart, en Allemagne, a permis de faire valoir la position française et de progresser sur ces sujets. Ces travaux prennent du temps car les experts de tous les pays, y compris les représentants des constructeurs nord-américains et japonais, désirent des outils qui soient les plus opérationnels possibles et qui ne laissent pas place à l'interprétation. Les travaux sur le CAL avancent bien, mais un consensus international sur le TAF se dessine plus lentement.

Évidemment, les enjeux de formations associés à ces nouvelles réglementations et leurs implications technologiques sont eux aussi majeurs. Pour cela, la SIA a défini deux formations : la première, « La cybersécurité du véhicule connecté », apporte les bases du sujet à des non-spécialistes. La seconde, « L'essentiel de la norme ISO/SAE 21434 », est destinée aux ingénieurs qui sont amenés à utiliser cette norme au quotidien, et porte sur sa mise en application. La première session de cette formation a montré que la cybersécurité était un sujet plus accessible qu'il n'y paraît. Il s'agit d'une discipline de l'ingénierie, et toute personne intéressée peut acquérir les compétences nécessaires ●

Bertrand Gay





Une nouvelle formation SIA

Cybersécurité du véhicule connecté

La cybersécurité est devenue un enjeu majeur pour les véhicules connectés.

Cette formation vous permettra d'identifier la surface d'attaque des véhicules et les menaces associées à leur architecture électrique électronique. Les techniques de sécurisation au niveau véhicule, composant et serveur embarqué seront abordés pour vous permettre de contribuer à la chaîne de confiance du véhicule connecté.



Prochaines sessions

18 sept.

Présentiel

17 déc.

Présentiel



↳
Inscriptions

Avec le support de :

Qualiopi
processus certifié

REPUBLICQUE FRANÇAISE

La certification qualité a été délivrée au
titre de la catégorie d'action suivante :
- Actions de formation

Fiev

SNECI

Contact: larissa.riffaud@sia.fr • www.sia.fr

Les événements SIA 2024

> Ouverts à tous

Le système batterie : technologies et leviers de performance

Journée d'étude

21 mars 2024, IFPEN - Solaize

- 8 présentations // 150 participants
- Exposition & Offres de visibilité

Les technologies de l'hydrogène

Journée d'étude

9 juillet 2024 - Région parisienne

- 8 présentations // 100 participants
- Exposition & Offres de visibilité

High Performance Hydrogen Internal Combustion Engine

International Conference

16 May 2024, Université d'Orléans - Orléans, France

- 8 presentations // 250 attendees
- Exhibition & Advertising opportunities

Simulation numérique & IA

Journée d'étude

Septembre 2024, Technocentre - Guyancourt

- 8 présentations // 100 participants
- Exposition & Offres de visibilité

SIA Powertrain 2024

International Congress

19-20 June 2024, Palais des Congrès - Lille, France

- 60 presentations // 700 attendees
- Test-Drive Cars
- Exhibition & Advertising opportunities

SIA VISION 2024

International Congress

16-17 October 2024, Cité des Sciences et de l'Industrie - Paris, France

- 40 presentations // 700 attendees
- Test-Drive Cars
- Exhibition & Advertising opportunities

NeMMO 2024

SIA - SFIP International Congress

3-4 July 2024, Couvent des Jacobins - Rennes, France

- 25 presentations // 200 attendees
- Exhibition & Advertising opportunities

Holistic Safety

Journée d'étude

21 Novembre 2024, ECE - Paris

- 8 présentations // 100 participants
- Exposition & Offres de visibilité

Avec le soutien de la Filière Automobile / With the support of the Automotive Industry

Journée d'étude du 16 mai 2024

Les moteurs à combustion d'hydrogène hautes performances

La propulsion par moteur à combustion interne d'hydrogène n'intéresse pas uniquement le monde des véhicules utilitaires. En raison de sa densité de puissance très supérieure à celle de la chaîne de traction à batterie, elle vise également une application d'une plus grande visibilité médiatique : celle des moteurs à hautes performances. Cette 3^e édition de la journée d'étude sur les moteurs à combustion d'hydrogène a ainsi été consacrée à ce marché spécifique, honorée par la présence d'acteurs de renom.

Présidée par Nouredine Guerrassi, de l'ESTACA et également Président de la Communauté des Experts des Technologies de Chaînes de Traction de la SIA, et Fabrice Foucher, de l'Université d'Orléans, cette journée d'étude, tenue au laboratoire PRISME, a réuni plus de 180 participants.

Le moteur à combustion d'hydrogène hautes performances, thème de cette édition, vise bien sûr les véhicules de compétition, mais également les marchés en devenir des supercars et des usages industriels et commerciaux extrêmes concernant certains poids lourds, engins de chantier, dameuses, etc. Le moteur hautes performances se caractérise par une forte densité de puissance, un rapport masse/puissance du véhicule réduit, un comportement dynamique lors des

phases transitoires et, selon les applications, par des spécificités telles qu'un rendement élevé ou un profil de couple particulier.

Les motivations du monde de la course automobile pour le moteur à hydrogène sont fortes, à commencer par le fait que de nombreuses compétitions ne pourront pas fonctionner avec des véhicules à batterie en raison de leur trop faible autonomie. Le moteur à combustion d'hydrogène n'est pas sujet à cette limitation. En outre, il offre une densité de puissance supérieure, bénéficie d'une grande expérience des motoristes, permet de disposer de groupes motopropulseurs à coût réduit et, motivation plus subjective mais ô combien fondamentale, offre une musicalité irremplaçable qui renforce l'émotion des spectateurs.



Moteur à combustion versus pile à combustible

Un calcul réalisé par AVL indique que si une voiture de course à essence lors d'une saison complète émet 5 000 kg CO₂eq, elle n'en produirait que 1 400 kg CO₂eq avec un hydrogène bleu (produit à partir de gaz naturel ou de charbon couplé à un dispositif de capture de carbone), et 400 kg CO₂eq avec un hydrogène vert (produit par électrolyse de l'eau à l'aide d'énergies renouvelables).

Phinia a réalisé une simulation comparative sur la participation de deux véhicules virtuels aux 24H du Mans, l'un avec un moteur thermique et l'autre avec une pile à combustible, chacun disposant de 350 kW et embarquant 12 kg d'hydrogène. Le premier, malgré un rendement maxi sous pleine charge de 33 % de son moteur contre 42 % pour la pile, effectuerait un tour en 215 s contre 228 s, ce temps moyen corrigé intégrant des arrêts au stand plus fréquents pour remplir les réservoirs. La voiture à pile à combustible est en fait pénalisée par sa résistance aérodynamique plus élevée due à la plus grande surface de ses radiateurs, ce que rappelle également Alpine.

Une étude menée par IFPEN et la FIA révèle qu'une Formule 1 répondant à la réglementation de 2026, toujours avec un V6, 1,6 l, mais alimentée en hydrogène et suivant des hypothèses très spécifiques, requerrait 33 kg de ce gaz pour parcourir les 300 km d'une course.

Débat majeur sur la richesse du mélange air/hydrogène

Le paramètre le plus souvent débattu par les motoristes a concerné le lambda du mélange air/hydrogène. Rappelons que le coefficient d'air lambda (λ) est le rapport entre le dosage du mélange du moteur concerné et celui stœchiométrique. Ce dernier correspond au rapport théorique air/carburant pour une combustion idéale, soit 34,2 g d'air pour 1 g d'hydrogène, donc 34,2 : 1 (14,7 : 1 pour l'essence). Ainsi, un lambda de 2,3 indique que le mélange brûle avec 2,3 fois plus d'air qu'avec le rapport théorique air/carburant. Les mélanges à lambda supérieur à 1 sont également nommés mélanges pauvres.

Ce ratio a été continuellement abordé dans les débats car il engendre de nombreuses conséquences sur les caractéristiques d'un moteur. La majorité des projets dédiés aux véhicules routiers, que ce soient des voitures ou des poids lourds, ont pris la voie d'un lambda compris entre 2 et 2,5. IFPEN rappelle que la combustion de ce mélange pauvre offre le meilleur rendement thermique, permet une combustion ne produisant pratiquement pas d'oxydes d'azote (NOx) et réduit le risque de pré-allumage (auto-allumage avant l'étincelle de bougie, pouvant générer des pics de pression élevés et destructifs). Le principal inconvénient d'un lambda élevé concerne le grand besoin en air, d'autant que la turbine du turbocompresseur reçoit moins d'énergie (température des gaz d'échappement inférieure à celle d'un lambda 1) et que le compresseur doit comprimer plus d'air. Un turbocompresseur optimisé pouvant être insuffisant pour ce type d'application, une double suralimentation ou une assistance électrique permettent de répondre à cette contrainte.

Le débit massique d'air des moteurs hautes performances atteint un niveau très élevé. Ainsi, IFPEN indique qu'un moteur d'une cylindrée de 2 litres devant fournir 550 kW avec



4-cylindres AVL.

un mélange à lambda de 2,5 doit disposer d'une pression de suralimentation de près de 6 bars!

Face à cette contrainte de taille, la plupart des projets de moteur hautes performances ont été développés avec un objectif de lambda proche de 1 sous pleine charge, ou avec un maxi de 1,8. Avec un lambda de 1, le débit d'air est de seulement 85 % de celui d'un moteur à essence de puissance identique. En contrepartie, un système d'injection d'eau dans les cylindres doit être implémenté afin de repousser le risque de pré-allumage. Le moteur rejette des NOx, mais cette émission n'est généralement pas réglementée en compétition, et il est également possible d'adjoindre un lourd et encombrant catalyseur SCR. FEV indique que le risque de combustion anormale peut être réduit par une lubrification adaptée, une injection d'eau dans les cylindres, une meilleure homogénéisation du mélange et un refroidissement ciblé dans les composants.

Ferrari a pour sa part présenté les caractéristiques, obtenues par simulations, d'un moteur à hydrogène pour une supercar de route ayant le niveau de performance d'une 296 GTB. Une solution mixte est proposée : lambda 1 pour des charges supérieures à 25 % du maxi (PMI de 7 à 35 bars) et un mélange ultra pauvre (lambda jusqu'à 3!) pour les faibles charges correspondant à une conduite non sportive. Une injection d'eau entre en fonction lorsque la PMI dépasse 25 bars, et éventuellement sous faible charge à lambda 2,5 afin d'améliorer le rendement.



Autour du V8 Pipo Moteurs.

● ● ● Différents moteurs de compétition présentés

Afin de réduire les coûts de développement, de nombreux projets portent sur l'adaptation à l'hydrogène d'un moteur hautes performances fonctionnant initialement à l'essence. AVL indique qu'il est alors nécessaire d'adapter de nombreux composants déjà en place : système d'allumage sans énergie résiduelle, bougies d'allumage plus froides, turbo-compresseur pour une pression de suralimentation supérieure, tubulure d'échappement afin notamment de réduire la contre-pression, ainsi que pistons, segments, sièges et soupapes plus résistants à l'usure.

Une attention doit par ailleurs porter sur la culasse, le bloc-cylindres et le vilebrequin concernant leur circuit de refroidissement et leur résistance mécanique face aux pics de

pression. Les systèmes de ventilation et de séparation de l'huile du bas moteur doivent être revus, et il est nécessaire de vérifier la compatibilité avec l'hydrogène de certains matériaux en plastique ou en aluminium, particulièrement à l'admission.

Solution F a ainsi adapté un V8 de General Motors d'une cylindrée de 6,2 l à compresseur volumétrique. Un lambda entre 1,35 et 1,6 a été choisi afin d'éviter les combustions anormales aux lambda inférieurs et ne pas atteindre des valeurs extrêmes de suralimentation et de pression dans les cylindres aux lambda supérieurs. 400 kW à 6500 tr/min et 750 Nm à 4500 tr/min ont été obtenus, contre 478 kW et 880 Nm en version essence. Une seconde génération est en développement.

Bosch a modifié un V6 3,0 l essence en intégrant des injections directe et indirecte d'hydrogène, ainsi qu'une injection d'eau. Le rapport volumétrique a été réduit à 10 :1 et le lambda est d'environ 1,5. Les motoristes ont obtenu 280 kW avec uniquement l'injection directe, 312 kW en ajoutant l'injection d'eau et 443 kW en ajoutant l'injection indirecte. Plusieurs voies technologiques sont actuellement étudiées afin d'atteindre 550 kW à 7500 tr/min.

AVL a développé un 4-cylindres 2,0 l à partir d'une page totalement blanche afin d'atteindre l'objectif très ambitieux d'une puissance spécifique de 150 kW/l. Ce résultat a été obtenu avec un rapport volumétrique de 10 :1, un lambda de 1 et une injection d'eau dans les cylindres afin de limiter les pics de pression indésirables. Le moteur développe 300 kW à 6500 tr/min et 500 Nm entre 3000 et 4000 tr/min. Le travail continue actuellement afin de mieux déterminer le niveau de fiabilité et de minimiser la consommation d'eau.

Le motoriste ORECA est pour sa part parti de son 4-cylindres 2,0 l suralimenté, prévu dès le départ pour la compétition – il a notamment obtenu de nombreuses victoires en Rallycross avec la version essence d'environ 450 kW. Le turbocompresseur d'origine a pu être conservé. L'injection directe est alimentée sous 40 bars et les injec-



4-cylindres Oreca.



V8 Pipo Moteurs.

teurs d'hydrogène ont pris la place de ceux d'essence en position latérale. Les performances actuelles dépendent des choix technologiques : entre 300 kW à 6 000 tr/min (150 kW/l) avec un λ de 1,3 et une injection d'eau, et 185 kW à 5 500 tr/min avec un λ de 1,8 sans injection d'eau. Les études sur les émissions de NOx sont en cours. IFPEN et la FIA ont investigué par simulations les possibilités du passage à l'hydrogène d'un moteur du championnat du monde des rallyes WRC : un 4-cylindres de 1,6 l, disposant d'un turbocompresseur avec turbine à géométrie variable, pourrait développer 290 kW à 7 500 tr/min avec un λ entre 2 et 2,5. Cette valeur de λ permettrait de diviser les émissions de NOx par plus de 4, comparées à celles de la version d'origine à essence et λ 1. Une injection d'eau avec une combustion à λ 1 ne supprimerait que partiellement les émissions de NOx.

L'évolution de la réglementation dans le sport automobile et ses impacts

Présidée par Frédéric Charon, la table ronde de la fin de journée a traité le sujet de l'évolution de la réglementation dans le sport automobile pour intégrer l'hydrogène comme carburant. Ce thème est loin d'être anodin puisque des décisions de la FIA peuvent avoir des retombées non négligeables sur les futures compétitions, voire sur les véhicules routiers. L'Automobile Club de l'Ouest (ACO) a engagé un programme de participation aux 24H du Mans de véhicules à hydrogène, qu'ils soient à moteur à combustion interne ou à pile à

combustible, alors que l'organisateur n'a pas retenu le véhicule électrique à batterie en raison de sa faible autonomie. Responsable des groupes motopropulseurs à la FIA, Vincent Pereme a marqué sa préférence pour le moteur à combustion et le son enthousiasme qu'il émet.

Un autre débat a concerné le moyen de stockage de l'hydrogène : gazeux sous 700 bars ou liquide dans un réservoir cryogénique. La FIA préfère la solution liquide en raison de sa plus grande sécurité, ainsi que de sa densité énergétique supérieure. Pierre-Jean Tardy, responsable des projets Hydrogène chez Alpine Racing, indique qu'un enjeu concerne l'ajout d'une pompe embarquée qui doit générer une pression dans le système d'injection.

Le sujet majeur des émissions de NOx est de nouveau revenu sur la table. Bernard Niclot, de l'ACO, rappelle que l'objectif est de mettre en compétition des véhicules dits « zéro émission ». La FIA et Alpine préféreraient une réglementation fixant une valeur limite de NOx, le niveau de ce seuil pouvant faire basculer le choix vers l'un ou l'autre mode de propulsion, selon l'ACO. Victor Gasté, expert combustion chez AVL, indique que le développement d'un moteur à mélange pauvre est plus complexe qu'un à λ 1, et qu'une limite de NOx serait une contrainte nouvelle en compétition. Le surcoût de cette voie est également un critère à prendre en compte.

Quelques heures avant le départ des 24H du Mans 2024, le 15 juin prochain, quatre démonstrateurs à hydrogène feront un tour du circuit, dont l'Alpine Alpenglow Hy4, la MissionH24 et la Ligier JS2 RH2 ●

Yvonnick Gazeau