

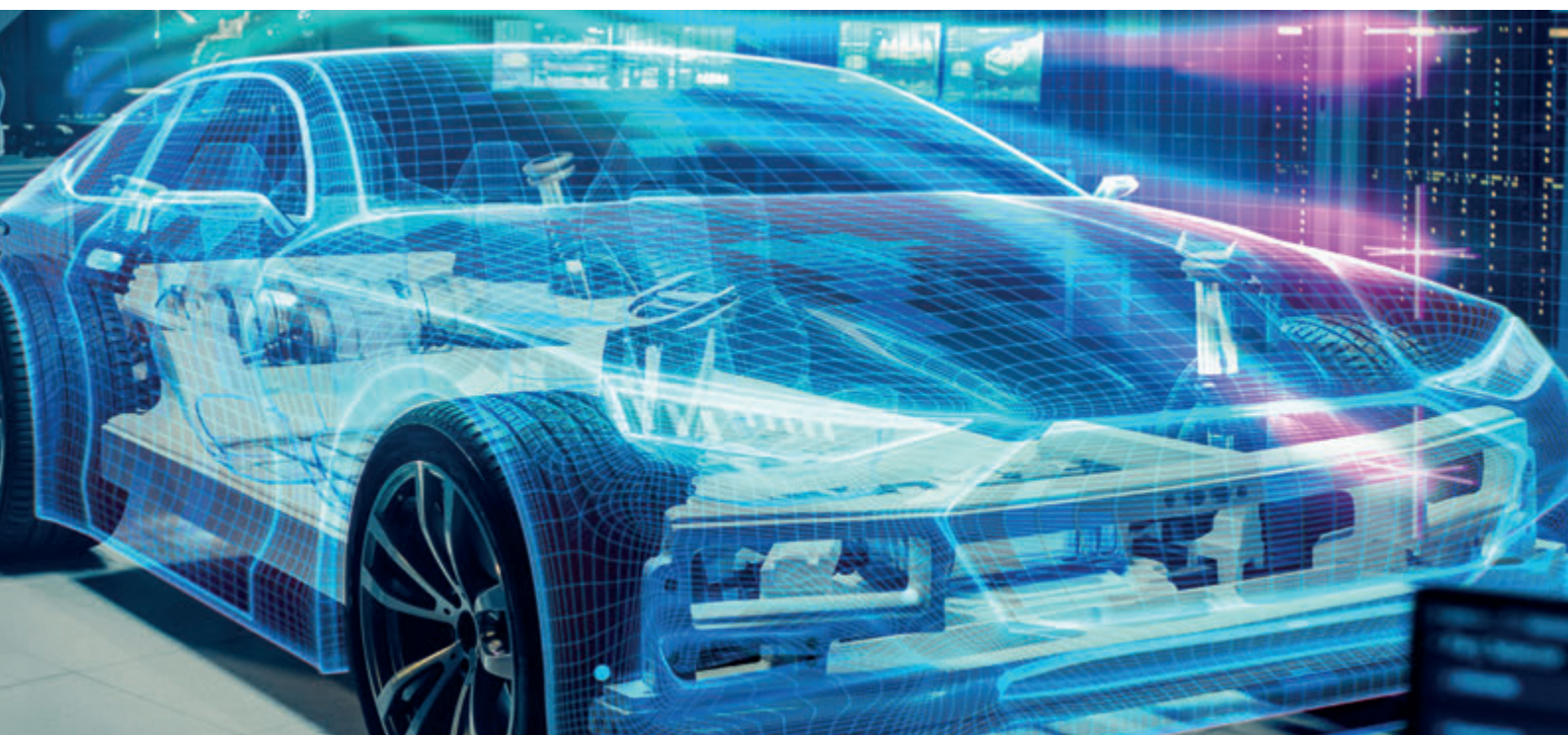
RAPPORT D'ACTIVITÉ

2022

INNOVER
LA MOBILITÉ

CARNOT

IFPEN TRANSPORTS ENERGIE



Pages

03

LE MOT DU DIRECTEUR

04

IFP ENERGIES NOUVELLES

05

LE CARNOT IFPEN TRANSPORTS ENERGIE EN BREF

06

ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE

- L'AMÉLIORATION DU RENDEMENT DES MOTORISATIONS BAS CARBONE
- LA PROPULSION HYDROGÈNE AU SERVICE DE LA MOBILITÉ DÉCARBONÉE
- ACCOMPAGNER L'ÉLECTRIFICATION DES VÉHICULES
- LA DIGITALISATION, CLÉ DE VOÛTE DE LA MUTATION DES MOBILITÉS

10

GRAND ANGLE :

- TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET MOBILITÉ : LE RÔLE CLÉ DES ANALYSES ENVIRONNEMENTALES

12

RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE

20

PROFESSIONNALISATION ET DÉVELOPPEMENT DE PARTENARIATS SOCIO-ÉCONOMIQUES

27

UNE DYNAMIQUE EUROPÉENNE

28

SALONS ET MANIFESTATIONS 2022

29

SÉLECTION DE PUBLICATIONS

SOMMAIRE

LE MOT DU DIRECTEUR



En 2022, malgré un paysage économique encore fragile qui affecte le secteur automobile en particulier, le Carnot IFPEN Transports Energie (TE) a réaffirmé sa position d'acteur majeur au service de la recherche et de l'innovation dans le domaine des mobilités durables.

Alors que l'objectif de zéro émission de CO₂ à l'usage pour les nouveaux véhicules légers et utilitaires légers a été réaffirmé à l'échelle européenne pour 2035, de même qu'une réduction drastique de 90 % des émissions de CO₂ des poids lourds à l'horizon 2040, la future norme pollution Euro 7, qui établit des limites plus strictes sur les émissions de polluants des véhicules, a été également divulguée pour une application dès 2025. Aujourd'hui le

Carnot IFPEN TE, qui a anticipé les changements en orientant son ressourcement scientifique vers les besoins futurs dans le domaine de la mobilité, opère une diversification stratégique en élargissant ses domaines de recherche et les partenariats associés.

La recherche collaborative a mobilisé les équipes, avec des réponses aux appels à projets couronnées de succès. Ces initiatives renforcent la position du Carnot à l'échelle européenne sur des thématiques majeures telles que l'électrification (batteries, moteurs et électronique) et la digitalisation.

Dans un souci de diversification, nous avons établi des partenariats avec de nouveaux acteurs, explorant ainsi des domaines tels que l'analyse du cycle de vie (ACV) devenue un outil de référence pour l'aide à la prise de décision dans le secteur des transports (voir page 10). Nous avons également engagé des travaux sur l'électrification des véhicules tout-terrain et de loisirs, qui doivent eux aussi répondre à des exigences de réduction des émissions de plus en plus strictes.

Forts de notre expertise reconnue dans le contrôle des groupes motopropulseurs électriques, nous avons élargi nos activités dans ce domaine en continuant à collaborer avec des partenaires historiques et en travaillant avec de nouveaux acteurs.

2022 a par ailleurs marqué le renforcement de liens avec les Carnot Clim-Adapt à travers un projet de modélisation des mobilités (voir page 24) et Energie du Futur à travers le projet Melchior (voir page 8) qui a pour objectif la mise au point d'un moteur électrique contenant une quantité d'aimants réduite et pour lequel la collecte en fin de vie des matériaux stratégiques est possible. A l'image de ces ambitieux projets, les partenariats inter-Carnot sont source de partage de connaissances et de bonnes pratiques et favorisent l'émergence de solutions innovantes basées sur une approche pluridisciplinaire.

Enfin, grâce à l'abondement dont nous bénéficions, nous nous sommes engagés dans l'exploration de matériaux pour les futures générations de batteries, avec comme objectif de développer des solutions plus performantes et durables à la fois.

Résolument engagé dans la recherche et l'innovation, le Carnot IFPEN TE déploie ses compétences et son dynamisme pour relever les défis liés aux mobilités de demain. Découvrez dans ce rapport annuel les différentes facettes et les principaux succès qui ont ponctué l'année.

Bonne lecture !

Gaëtan Monnier

Directeur du Carnot IFPEN Transports Energie

IFP ENERGIES NOUVELLES



IFP Energies nouvelles (IFPEN) est un acteur majeur de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement. Depuis les concepts scientifiques en recherche fondamentale, jusqu'aux solutions technologiques en recherche appliquée, l'innovation est au cœur de son action, articulée autour de quatre orientations stratégiques : climat, environnement et économie circulaire – énergies renouvelables – mobilité durable – hydrocarbures responsables.

Dans le cadre de la mission d'intérêt général confiée par les pouvoirs publics, IFPEN concentre ses efforts sur l'apport de solutions aux défis sociétaux et industriels de l'énergie et du climat, au service de la transition écologique. Partie intégrante d'IFPEN, IFP School, son école d'ingénieurs, prépare les générations futures à relever ces défis.

UNE RECHERCHE CENTRÉE SUR L'INNOVATION

Les programmes de R&I d'IFPEN ont pour objectif de lever des verrous scientifiques et technologiques afin de déboucher sur des innovations valorisables par l'industrie.

Face à une large gamme de questionnements scientifiques ouverts, la recherche fondamentale d'IFPEN vise à produire un socle transverse de connaissances nouvelles, de concepts et méthodologies, support au développement des innovations de demain.

Les projets sont souvent menés dans un cadre collaboratif avec des partenaires académiques et industriels.

Les chercheurs d'IFPEN apportent régulièrement leur expertise scientifique aux pouvoirs publics, afin de leur fournir des éléments d'éclairage utiles à la décision. Engagé dans de nombreux projets, plateformes technologiques et réseaux dans le cadre d'Horizon Europe, IFPEN contribue également à faire émerger une vision européenne de la recherche dans les domaines de la mobilité, de l'énergie et de l'environnement.

Les programmes de recherche appliquée sont structurés autour des quatre orientations stratégiques :

- climat, environnement et économie circulaire : réduire l'impact des activités humaines et industrielles sur le climat et l'environnement ;
- énergies renouvelables : produire, à partir de sources renouvelables, de l'énergie, des carburants et des intermédiaires chimiques ;
- mobilité durable : développer des solutions pour des transports efficaces et à faible impact environnemental ;
- hydrocarbures responsables : répondre à la demande en énergie et en produits chimiques de manière plus respectueuse de l'environnement.

UN FINANCEMENT PUBLIC/PRIVÉ

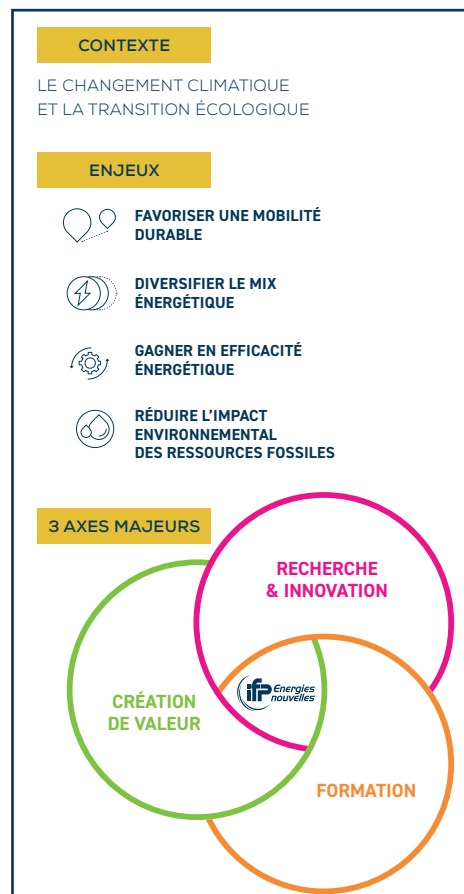
Le financement d'IFPEN est assuré à la fois par le budget de l'État et par des ressources propres provenant de partenaires industriels.

LA CRÉATION DE VALEUR

IFPEN contribue à la création de richesse et d'emplois, en soutenant la compétitivité des acteurs industriels et en favorisant le développement économique des filières liées aux secteurs de la mobilité, de l'énergie, de l'environnement et des éco-industries. Le modèle d'IFPEN repose sur la valorisation industrielle des technologies développées par ses chercheurs. La mise sur le marché des innovations se fait au travers de partenariats étroits avec des industriels et via les filiales de son groupe. Sur des marchés émergents ou matures, IFPEN crée ainsi des sociétés ou prend des participations dans des entreprises prometteuses. Par ailleurs, IFPEN accompagne le développement de start-up et PME dans le cadre d'accords de collaboration leur permettant de bénéficier de son savoir-faire technique et juridique.

LA FORMATION VECTEUR DE COMPÉTITIVITÉ

Dans le contexte de la transition énergétique, IFP School forme des talents pour relever les défis techniques, économiques et environnementaux, tout en accompagnant les industriels dans leurs besoins en personnel hautement qualifié. Rayonnant à l'international, IFP School propose à de jeunes diplômés des formations de niveau Master pour les métiers d'aujourd'hui et de demain dans les domaines de l'énergie, de l'automobile et de l'environnement. Elle décerne ainsi un diplôme tous les ans à plus de 500 étudiants issus du monde entier.



LE CARNOT IFPEN TRANSPORTS ENERGIE EN BREF



Le Carnot IFPEN Transports Energie est un acteur de la transition énergétique et environnementale vers une mobilité décarbonée et durable. Il propose et développe des solutions innovantes, technologiques et/ou digitales pour l'industrie, les usagers et les décideurs publics, afin d'accroître l'efficacité énergétique et réduire les impacts environnementaux des systèmes de transports. Il accompagne les mutations liées à la transition écologique, énergétique et numérique de la mobilité.

Innover

Des solutions innovantes pour la décarbonation et la digitalisation de la mobilité telles que des :

- machines électriques pour une large gamme de puissance, électronique de pilotage à haut rendement et contrôle associé,
- systèmes électrochimiques de stockage et de production d'énergie (batteries et piles à combustible) et gestion optimale de l'énergie des véhicules,
- propulsion hydrogène et bas carbone (gaz, biogaz) : moteur à combustion optimisé et système de dépollution associé,
- webservices d'analyses énergétique, économique et environnementale du transport individuel et collectif,
- outils de l'ingénierie de conception des systèmes de propulsion afin d'en améliorer l'efficacité énergétique et d'en limiter l'impact environnemental.

Collaborer

- **Des relations privilégiées avec l'industrie** : des start-up, TPE, PME, ETI jusqu'aux grands groupes industriels français et internationaux
- **Un engagement fort au sein de pôles de compétitivité** (NextMove, CARA, etc.)
- **Une synergie avec des réseaux de partenaires** académiques et des laboratoires de R&D au rayonnement international
- **Une présence active au sein d'instances européennes** représentatives de la recherche et de l'industrie (EARPA, ERTRAC, EGVIafor2ZERO, POLIS, CCAM, BEPA).

Valoriser

Un accompagnement des filières industrielles sur un champ très large de niveau de maturités technologiques (TRL 2 à 9)

Un transfert de nos résultats R&D au travers de :

- co-développements de produits avec cession de licence d'exploitation,
- partenariats stratégiques,
- contrats de recherches collaboratives.

Le Carnot IFPEN Transports Energie en 2022, c'est :

62 contrats en cours pour un panel de 34 entreprises

26 projets de recherche collaborative auxquels contribuent 149 entreprises partenaires

293 personnes impliquées dans les projets en 2022

Près de 35 doctorants, dont 2 en thèse Cifre

25 brevets déposés dans l'année et 308 détenus dans le portefeuille de brevets

Plus de 30 publications de rang A

ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE

La décarbonation du secteur des transports réclame des efforts de recherche accrus pour réduire toujours davantage l'impact environnemental des technologies utilisées, recourir à des vecteurs d'énergie plus propres comme l'électricité ou l'hydrogène issus d'énergies renouvelables, ou les biocarburants et électrocarburants et exploiter les possibilités d'optimisation offertes par la digitalisation. Pour effectuer cette transition énergétique et écologique qui concerne les entreprises du secteur, les collectivités et les citoyens, le Carnot IFPEN TE se mobilise en France et en Europe.

L'AMÉLIORATION DU RENDEMENT DES MOTORISATIONS BAS CARBONE

L'atteinte des objectifs ambitieux de réduction de 30 % des émissions de CO₂ des poids lourds en 2030 par rapport à 2019 requiert l'utilisation de systèmes de combustion avancés alimentés avec des carburants bas carbone liquides ou gazeux (biocarburants, électrocarburants, gaz naturel et biogaz voir hythane). Les travaux effectués en 2022 ont permis d'améliorer le rendement des motorisations utilisant ces carburants.

Lors de la présentation des avancées du projet LongRun, qui vise un ensemble complet de chaînes de traction pour poids lourds et autocars plus respectueux de l'environnement, le système de combustion IFPEN Swumble™ a affiché des rendements supérieurs de 10 à 15 % à ceux d'un moteur de série. Rappelons que dans le cadre de ce projet, le Carnot IFPEN TE apporte notamment ses compétences sur la conception et la caractérisation de systèmes de combustion pour carburants à faible impact CO₂ ainsi que sur le développement de services connectés d'eco-routing et d'eco-driving pour réduire l'énergie consommée en usage. En parallèle, le projet européen Phoenix, qui a pour objectif de développer un démonstrateur de véhicule hybride rechargeable avec un niveau de consommation de carburant et d'émissions de polluants réduit, s'est poursuivi avec l'objectif de contribuer à accélérer la transition vers une mobilité plus respectueuse de l'environnement en termes de qualité de l'air et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. D'autres travaux en cours concernent la gestion et le contrôle de la boucle d'air ainsi que l'optimisation de certaines grandeurs du système de combustion, comme le taux de compression.



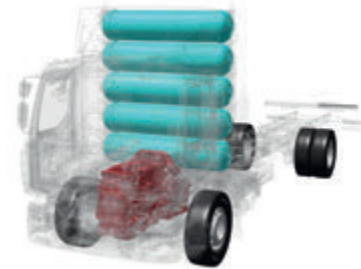
LA PROPULSION HYDROGÈNE AU SERVICE DE LA MOBILITÉ DÉCARBONÉE

Le Carnot IFPEN TE mobilise ses efforts sur des solutions permettant d'utiliser l'hydrogène renouvelable ou bas carbone afin de réduire l'impact environnemental de la mobilité. Pour le système pile à combustible (PàC), les travaux se concentrent sur le dimensionnement de ce système et la maîtrise de son vieillissement ainsi que son optimisation énergétique au travers du contrôle associé à son électronique de pilotage, pour en maîtriser le coût et la durée de vie, en se basant notamment sur des moyens numériques et expérimentaux uniques.

Les équipes travaillent également à l'optimisation de la combustion directe de l'hydrogène dans un moteur thermique afin d'en maximiser le rendement et d'atteindre des émissions d'oxydes d'azote (NOx) quasi nulles.

DÉCARBONER LA MOBILITÉ LOURDE À MOINDRE COÛT

Le projet PLH2, coordonné par Volvo Group - Renault Trucks avec pour partenaire le Carnot IFPEN TE, fait partie des projets impulsés par le comité d'orientation pour la recherche automobile et mobilité (CORAM). Il vise à équiper en motorisations thermiques à hydrogène les véhicules à fort tonnage avec un coût total de possession très proche de celui de leur équivalent diesel. Le Carnot IFPEN TE est chargé de la calibration du moteur 6 cylindres de type MDE 8. Les technologies existantes sont en cours d'adaptation avec un objectif de maîtrise des coûts. Ce moteur pourra équiper aussi bien des poids lourds que des bus. Une utilisation marine est envisagée par Volvo Penta. La base expérimentale permet aux équipes d'IFPEN de vérifier la prédictivité des codes de calcul 3D de combustion (pression dans le cylindre, vitesse de combustion, transferts thermiques aux parois, etc.) et de balayer l'influence des paramètres de réglage (phasage de l'injection, richesse, etc.) ou géométriques (injecteur hydrogène, bougie, etc.) sur cette combustion.



PROJET HYMOT : UN DÉMONSTRATEUR POUR UNE OFFRE DE VÉHICULES UTILITAIRES DÉCARBONÉS

Le projet HyMot (moteur à hydrogène), coordonné par Bosch et impliquant sept autres acteurs industriels et académiques* dont le Carnot IFPEN TE, fait partie des projets sélectionnés par le comité d'orientation pour la recherche automobile et mobilité (CORAM) dans le cadre du 4e programme d'investissement d'avenir. Il vise à démontrer la faisabilité de la décarbonation d'un véhicule utilitaire grâce à l'utilisation d'un moteur à combustion interne fonctionnant à l'hydrogène, en alternative à une électrification couplée à une pile à combustible hydrogène. Les travaux menés avec les partenaires ont pour but de proposer une nouvelle offre de véhicules utilitaires qui seront décarbonés et quasi zéro émission locale. Les équipes du Carnot IFPEN TE apporteront leur expertise dans le domaine des motorisations à hydrogène pour concevoir le système de combustion.

* Renault, Alpine Racing, Faurecia, OSE Engineering, TotalEnergies, École centrale de Nantes.



ACCOMPAGNER L'ÉLECTRIFICATION DES VÉHICULES

L'électrification des véhicules individuels est l'objectif principal de l'Union Européenne pour décarboner le secteur des transports. Tous les constructeurs français sont engagés dans cette transition et le Carnot IFPEN TE accompagne cette dynamique en améliorant la performance et l'efficacité énergétique des machines électriques et des systèmes électrochimiques de stockage ou de production d'électricité.

Dans le cadre de ses travaux sur la propulsion électrique, il développe des moteurs électriques sur une large gamme de puissances. Un ensemble moteur-onduleur intégré basse tension inédit en performances (38 kW sous 60 V), destiné à des petits véhicules électriques ou à des applications de retrofit, a été développé avec les sociétés EREM et Punch Powertrain France. Cet ensemble est industrialisé depuis 2022 par EREM. La technologie synchro-réductante utilisée pour le moteur offre d'excellentes performances avec une quantité réduite d'aimants, limitant les coûts de fabrication. Des lois de commande adaptées permettent un pilotage en couple du moteur très élaboré pour compenser cette faible quantité d'aimants. Par ailleurs, une motorisation de plus forte puissance est mise au point par les équipes du Carnot dans le cadre du projet ADEME H2D2 initié en 2022 dans le cadre du programme Démonstrateurs et territoires d'innovation de grande ambition (DTIGA). L'objectif est de concevoir, prototyper et tester un groupe motopropulseur alimenté par une pile à combustible pour les véhicules de plus de huit tonnes.

Enfin, **le Carnot IFPEN TE développe des méthodologies pour mieux comprendre les systèmes électrochimiques**, les rendre plus performants, mettre au point les nouvelles générations de batteries et en améliorer le recyclage. Un effort particulier est consacré à l'étude de l'emballage thermique des cellules de batteries. Des expériences, utilisant notamment des techniques de diagnostics optiques en enceintes transparentes, et des modélisations apportent leur éclairage sur cette problématique dans le cadre de projets collaboratifs.



PROJET MELCHIOR : FACILITER LE RECYCLAGE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Les Carnot IFPEN TE et Énergies du futur ont démarré en 2022 le projet collaboratif Melchior (Machines électriques dans une chaîne de valeur orientée vers le recyclage). D'une durée d'un an, il vise à développer un prototype de machine électrique utilisant une technologie d'aimant recyclable. Le projet privilégiera certains matériaux et définira les architectures pour faciliter le recyclage tout en conservant un bon niveau de performances.

LA DIGITALISATION, CLÉ DE VOÛTE DE LA MUTATION DES MOBILITÉS

La fin annoncée de la vente des véhicules particuliers et utilitaires légers neufs à moteur thermique en 2035 dans l'Union européenne accélère la mutation vers l'électrique mais pose des questions sur l'optimisation tant des technologies que des usages ou encore du déploiement des infrastructures associées. Dans ce contexte, le Carnot IFPEN TE développe des webservices alimentant des sites web de partenaires au travers d'outils de compréhension et d'analyse des besoins énergétiques, des coûts et de l'empreinte environnementale du transport individuel et collectif. Ces outils sont conçus en partenariat avec l'ADEME, la Fabrique de la logistique, l'Union des entreprises de transport et logistique de France ou encore Concauwe (voir pages 10-11).

Par ailleurs, le Carnot IFPEN TE poursuit le développement de briques logicielles pour aider à la conception des systèmes de motorisation. Ainsi, le contrat de partenariat avec Siemens Digital Industries Software a été renouvelé en 2022 pour les cinq prochaines années et la plateforme Amesim de simulation système a été ouverte à deux nouvelles thématiques : la modélisation de la PàC et l'usage et l'intégration du volet *real driving emissions* (RDE) dans la simulation. Enfin, la modélisation CFD 3D est développée avec le code CONVERGE dans le cadre d'un partenariat avec la société CSI, qui a été renouvelé pour cinq ans afin d'englober notamment la mobilité électrique (refroidissement de machines électriques, gestion et emballage thermique des batteries).

FIN DU PROJET CEVOLVER : SIMPLIFIER L'USAGE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Le projet CEVOLVER, coordonné par FEV Group et impliquant neuf acteurs industriels et académiques* dont le Carnot IFPEN TE, s'est achevé en 2022. Face au temps de charge, à l'autonomie et à l'accessibilité qui sont des facteurs clés pour l'adoption plus large des véhicules électriques, CEVOLVER a mis en place une approche centrée sur l'utilisateur afin de proposer des solutions pour des trajets longue distance confortables avec une batterie bien dimensionnée et à un coût abordable. Il s'agissait d'abord de réduire la consommation d'énergie des véhicules électriques grâce à de nouveaux systèmes de gestion thermique et énergétique. La connectivité a ensuite été mise à profit pour fournir au conducteur une prédiction d'autonomie plus précise et une assistance dans la quête de l'itinéraire le plus efficace pour le voyage longue distance (infrastructures de recharge rapide disponibles, une faible consommation d'énergie). Les équipes du Carnot IFPEN TE ont développé les algorithmes d'optimisation de parcours et de plans de recharge utilisés dans cette deuxième phase du projet.

* FEV Group, FCA-Stellantis, Ford, Bosch, IFPEN, Aachen Un., Vrije Un. Bruxelles, I2M, Uniresearch.



INTERVIEW DE

Frederik de Smett, ingénieur de recherche chez Ford



L'objectif principal du projet CEVOLVER était d'accroître la confiance des utilisateurs dans les véhicules électriques en améliorant l'efficacité énergétique, en réduisant le temps de parcours des longs trajets et en proposant des fonctionnalités nouvelles. Le projet a adopté une approche centrée sur l'utilisateur pour optimiser l'exploitation du système thermique. L'équipe Ford a apporté au projet un véhicule de démonstration basé sur le véhicule utilitaire E-Transit et a développé des scénarios d'utilisation pour l'Europe. Le matériel thermique, qui comprend des panneaux chauffants, un radiateur à basse température et un échangeur de chaleur entre deux circuits, a été optimisé pour ces scénarios.

Concernant les logiciels, CEVOLVER a démontré que l'eco-charging, développé par le Carnot IFPEN TE, minimise le temps de parcours d'un long trajet en optimisant les plans de recharge. L'autre outil d'IFPEN TE, l'eco-driving, réduit la consommation d'énergie sur les trajets courts. La démonstration de l'ensemble du système a été faite lors d'une excursion d'une journée de 700 kilomètres. Nous avons eu des échanges réguliers avec tous les partenaires et avec IFPEN TE notamment. Leur approche très réactive a clairement contribué au succès global du démonstrateur Ford.



TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET MOBILITÉ : LE RÔLE CLÉ DES ANALYSES ENVIRONNEMENTALES

Pour relever les défis de la transition écologique dans le domaine de la mobilité des personnes et des biens, les acteurs publics, les industriels et les citoyens ont besoin d'être accompagnés dans le choix des technologies les mieux adaptées aux nouvelles exigences. C'est par exemple le cas lors de la mise en œuvre, en France, de zones à faibles émissions (ZFE) pour répondre aux problématiques de qualité de l'air dans les grandes agglomérations. Le Carnot IFPEN TE répond à ces besoins en réalisant des études d'impact combinant différents types d'analyses : énergétiques, économiques, ou encore environnementales. Ces études sont souvent couplées à des webservices pour les rendre évolutives et accessibles au plus grand nombre.



Les analyses de cycles de vie (ACV), socle des feuilles de route mobilité

Dans la lignée de l'outil web grand public « Je change ma voiture » ou encore de l'étude technico-économique pour l'évolution des systèmes de propulsion du secteur fluvial menée avec VNF (voir ci-dessous), l'année 2022 a été marquée par des travaux destinés à alimenter les feuilles de route des différentes filières de la mobilité.

Par ailleurs, le Carnot IFPEN TE a réalisé plusieurs études avec l'ADEME, dont E4T 2040 : une analyse prospective sur les technologies à privilégier pour répondre aux enjeux de réduction des émissions de CO₂ du transport routier d'ici 2040 et TranpLHyn, une étude qui compare deux modes de propulsion à hydrogène sur les plans énergétique, économique et environnemental (voir ci-contre). Le Carnot IFPEN TE a également conçu, en collaboration avec la Fabrique de la logistique, l'outil « Verdir ma flotte », qui offre aux acteurs du secteur de la logistique devant décarboner leurs flottes, la possibilité de quantifier l'impact économique et écologique de carburants alternatifs et de technologies hybrides et électriques. Enfin, il a conduit une large étude pour le Concawe (division de l'association européenne des fabricants de carburants) visant à évaluer l'empreinte environnementale des véhicules hybrides rechargeables (PHEV) en conditions réelles d'utilisation (voir ci-contre).

Étude TranpLHyn : évaluer les bénéfices de l'hydrogène pour la mobilité lourde

En septembre 2022, IFPEN a publié, avec le soutien de l'ADEME, l'étude TranpLHyn (transports lourds fonctionnant à l'hydrogène). Elle compare sur le plan énergétique, économique et environnemental les deux modes de propulsion à hydrogène, par génération d'électricité dans une pile à combustible (PàC) ou par combustion dans un moteur thermique avec une architecture classique. Cette étude concernait quatre types de véhicule et a pris en compte quatre types de motorisation. Les principales conclusions montrent que les PàC présentent un meilleur bilan environnemental et énergétique que les moteurs thermiques à hydrogène, mais dans les deux cas le coût total de possession est multiplié par un facteur compris entre deux et trois par rapport au moteur thermique diesel avec un avantage pour le moteur à hydrogène.



INTERVIEW DE

Roland Dauphin, coordinateur scientifique sur la qualité des carburants et leurs émissions à Concawe



Le Carnot IFPEN TE a réalisé un travail remarquable en extrapolant les résultats expérimentaux par l'usage de simulations et de modèles mathématiques et en générant des cas d'usage bien au-delà de ce que pouvaient fournir les données expérimentales. Ces travaux ont donné lieu à un rapport conséquent, à plusieurs publications ainsi qu'à une application web. Cette dernière est déclinée sous une forme simplifiée accessible au grand public et sous une forme plus complète pour les experts. Elle est notamment utilisée pour appuyer les argumentaires des adhérents de notre association qui souhaitent faire valoir l'approche ACV. L'application permet de se rendre compte de la diversité des solutions bas

carbone disponibles dont l'électrification fait évidemment partie à condition que le mix énergétique ne soit pas trop carboné et que les batteries ne soient pas trop volumineuses. Les véhicules hybrides rechargeables ou non en font également partie, à condition qu'ils puissent utiliser des carburants bas carbone et, dans le cas des véhicules rechargeables, à condition de recharger les batteries régulièrement. Forte de ce succès, notre ambition est de poursuivre ces travaux en 2023.



Les ACV au service du verdissement du secteur fluvial

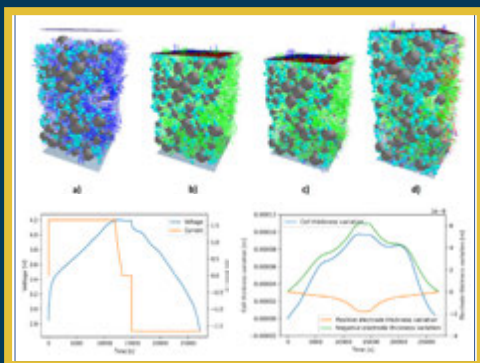
Réalisée par le Carnot IFPEN TE en partenariat avec le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et E2F, et avec le soutien de l'Union européenne (Fonds Feder), l'ADEME et CNR pour les voies navigables de France (VNF), l'étude FLUENT (*FLUvial ENergie Transition*) a été menée entre 2020 et 2022 sur le bassin fluvial Rhône Saône. Le but est d'établir une feuille de route de la transition énergétique du fluvial pour la période 2030 à 2050. Plus de 250 modélisations énergétiques ont été réalisées. Une cinquantaine de modèles significatifs ont été retenus et ont fait l'objet d'une analyse complète du cycle de vie, du puits à l'échappement et du berceau à la tombe, pour les composants du groupe motopropulseurs (GMP). Les recommandations de cette étude représentent un véritable outil d'aide à la décision pour les opérateurs fluviaux, les organismes de financement et les collectivités et territoires responsables des réseaux de distribution des nouvelles énergies. Ainsi, l'étude se poursuit sur l'ensemble des bassins français afin d'établir un schéma directeur de verdissement du secteur fluvial au plan national.

RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE

L'abondement Carnot offre au Carnot IFPEN TE l'opportunité d'accélérer le développement ou l'adaptation de ses compétences pour faire face à l'évolution des besoins du marché.



Développer les futures générations de batteries pour faire émerger une filière européenne



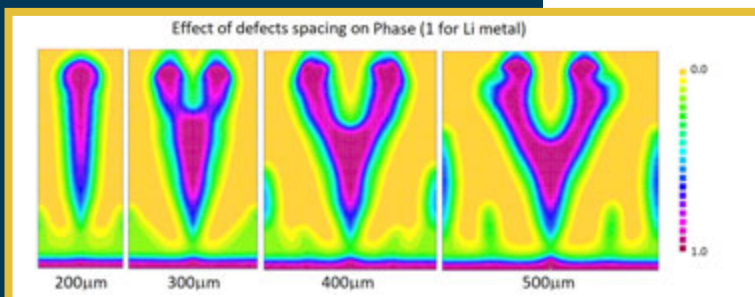
Modélisation mécanique des électrodes et électrochimique des batteries Gen3b

Problématique et axes de recherche

L'électrification des transports, et notamment l'automobile, poursuit sa progression et entraîne une augmentation de la demande en batteries. Maîtriser cette brique demeure essentiel pour les acteurs industriels concernés, et cela prend d'autant plus d'importance au regard de l'ambition visant à faire émerger une filière de batteries en Europe. Dans ce cadre, les travaux réalisés par le Carnot IFPEN TE ont pour objectif de mettre en place des outils et des méthodes pour accompagner le développement des futures générations de batteries et en particulier les futures batteries Li-ion (Gen3b) et les batteries tout solide (Gen4b).

En 2022, les axes de recherche ont porté sur :

- la finalisation et la validation des modèles de batteries Li-ion de Gen3b à négatives composites Si-C ;
- le développement de modèles pour les batteries tout solide à l'échelle cellule ;
- la mise en place des outils et méthodes de caractérisation propres aux technologies Gen4b.



Modélisation par approche phase Field de la croissance des dendrites de lithium dans les batteries Gen4b

LES RÉSULTATS OBTENUS

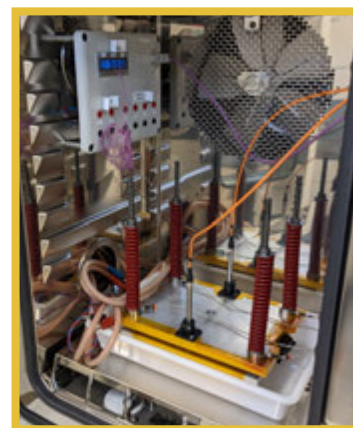
Les futures générations de batteries Gen3b (Li-ion à négatives Si-C) ou Gen4b (Li métal tout solide) sont par nature très différentes des générations précédentes. Elles nécessitent la mise en place de modèles utilisant d'autres approches ou intégrant d'autres dimensions physiques, et d'outils de caractérisation associés permettant la calibration de ces modèles.

Développement de différents modèles spécifiques à ces futures générations de batteries

- Des modèles mécaniques des électrodes composites Si-C (Gen3b) simulant leur gonflement au cours du fonctionnement.
- Des modèles globaux de batteries de génération Gen3b intégrant un couplage électrochimique-mécanique.
- Des modèles en approche phase-field permettant de prédire la stabilité de l'électrode négative de lithium et simulant la croissance dendritique (Gen4b).
- Des modèles globaux de batteries Gen4b intégrant la modélisation de la conduction ionique dans les électrolytes solides et l'influence de la pression sur les performances.

Mise en place des outils de caractérisation spécifiques à ces futures générations de batteries

- Des dispositifs de test de cellules prismatiques (pouch) permettant de maîtriser et de mesurer les contraintes et les déformations en cyclage (Gen3b et 4b)
- Des outils de caractérisation des électrolytes solides : conductivité et transport du lithium (électrolytes polymères ou inorganiques), fenêtre électrochimique et résistance à la croissance dendritique.



Support de test de cellules de batteries permettant le suivi du gonflement au cours du fonctionnement (déplacement et contraintes)



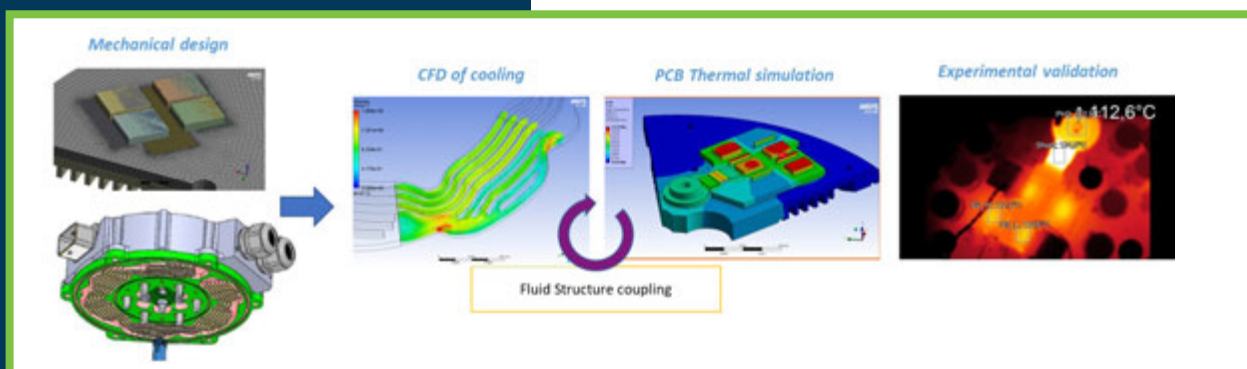
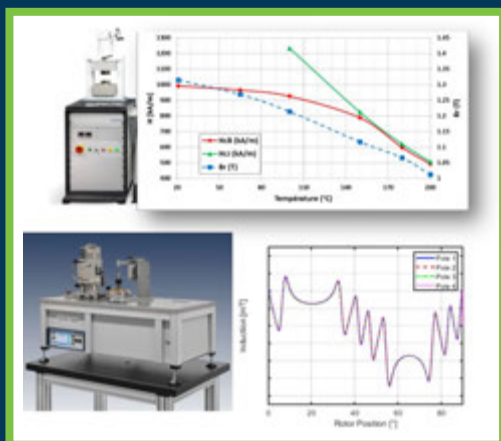
Déployer et compacter les systèmes de propulsion électriques

Problématique et axes de recherche

La généralisation des systèmes de propulsion électriques dans la mobilité et leur plus forte intégration apportent un nouveau lot de contraintes en conception de motorisations électriques, parmi lesquelles la modularité, l'impact sur le cycle de vie, le coût de fabrication, la prise en compte du recyclage, en complément du traditionnel compromis performances/coût. D'un côté apparaît le besoin de développer et déployer des outils d'aide à la conception multi physique, multi critère et de considérer des contraintes plus vastes sortant du domaine technique. De l'autre, il s'agit d'élaborer de nouvelles technologies et méthodes pour compacter un propulseur électrique.

L'action menée au sein du Carnot IFPEN TE en 2022 a porté sur :

- le développement des outils de calculs avancés pour l'aide à la conception des parties actives ;
- la caractérisation de composants de machines électriques ;
- le développement de nouvelles électroniques de puissance et des stratégies de contrôle.



LES RÉSULTATS OBTENUS

Nouvelle topologie de rotor à barrières de flux fluides

Le Carnot IFPEN TE a fait évoluer le workflow d'aide à la conception des machines grâce à un couplage fort des outils mathématiques d'optimisation avec la génération automatique de géométries rotor/stator et des simulations physiques associées. Ainsi, deux nouvelles topologies ont été élaborées et présentent un fort intérêt selon leur analyse de cycle de vie :

- Une topologie de rotors synchro-réductants sans aimants (terres rares) recyclables dans les processus actuellement disponibles dans la filière.
- Une topologie de rotors synchro-réductants assistés d'aimants avec des formes non prismatiques réduisant le besoin d'aimants (terres rares) en kg par kW de 30 %.

Nouvelles technologies et caractérisation d'aimants

En permettant l'évaluation approfondie des phénomènes physiques au sein d'une machine, la caractérisation des matériaux est primordiale pour la précision des calculs de conception de parties actives. Les équipes du Carnot se sont focalisées en 2022 sur les nouvelles technologies d'aimants, leur caractérisation à l'échelle du composant ainsi qu'assemblés dans le rotor pour identifier et analyser finement leurs caractéristiques réelles. Cela permet d'extraire des données importantes pour la calibration des modèles de simulation.

Levée du verrou puissance atteignable en basse tension

Le Carnot IFPEN TE a évalué une nouvelle topologie d'électronique basse tension (< 60V) à forte puissance et a élaboré le système de refroidissement associé, levant le verrou de la puissance atteignable en basse tension (> 20kW en continu et 40kW en pic sous 60V). L'ensemble mécatronique est intégré directement sur le moteur, profitant de la mutualisation du refroidissement, éliminant les câbles et réduisant les chutes de tension. La densité de puissance est évaluée à 20 kW/kg sous 60V, en rupture vis-à-vis de l'état de l'art.



Concevoir des machines électriques utilisant des aimants à base de terres rares recyclées

Problématique et axes de recherche

L'Europe vise pour 2030 une réduction de 55 % des GES issus de la mobilité terrestre. La solution choisie pour y parvenir est l'électrification massive du parc automobile, ce qui entraîne une forte contrainte sur l'approvisionnement en matériaux stratégiques. Parmi ces matériaux, il y a l'aimant composé de terres rares ayant un impact environnemental fort et très peu recyclé. De plus, l'architecture des moteurs utilisant ces aimants n'offre pas de possibilités de réparation, d'extraction des terres rares en fin de vie ou de leur réintroduction sur le marché.

En 2022, les travaux de recherche ont porté sur l'éco-conception de nouvelles topologies de machines électriques, utilisant des aimants à base de terres rares recyclées et facilitant le recyclage de l'ensemble des composants de ces machines y compris des aimants en intégrant les fonctions permettant leur collecte facile en fin de vie.

LES RÉSULTATS OBTENUS

La thématique « nouvelles technologies d'aimants et d'architectures de machines électriques » a été investiguée en 2022 dans le cadre d'une action inter Carnot menée conjointement par le Carnot IFPEN TE et le Carnot Energies du Futur. Ces derniers ont mis en place une démarche de compréhension des problématiques de recyclage ciblées sur les aimants ainsi que la définition et le prototypage d'un concept innovant.

Identification des verrous et exploration de solutions

Les travaux ont consisté tout d'abord à identifier, auprès des acteurs du recyclage, les verrous actuels en lien avec la collecte, la séparation et la valorisation des matériaux issus des machines, notamment les aimants. La phase d'exploration de solutions techniques a été menée sur deux volets parallèles :

- la réduction de la masse d'aimant utilisée pour une puissance obtenue, en exploitant la synergie entre l'aimant recyclé avec des formes fluides et fonctionnelles, développé par le Carnot Energies du Futur ;
- les barrières de flux du rotor maximisant la reluctance (125 kW/kg d'aimant) conçues par le Carnot IFPEN TE.

L'implémentation de fonctions permettant un accès rapide et l'extraction d'aimants du rotor sans leur endommagement ont aussi été prises en compte.

40 % de gains en CO₂ estimés

L'ensemble de la démarche a été guidée par l'analyse du cycle de vie de la machine et de l'aimant recyclé, menée conjointement par les deux Carnot. Cette analyse permet d'estimer le gain en CO₂ à 40 %. Le concept de machine a été breveté et la diffusion des résultats est programmée à travers cinq conférences qui se tiendront en 2023.





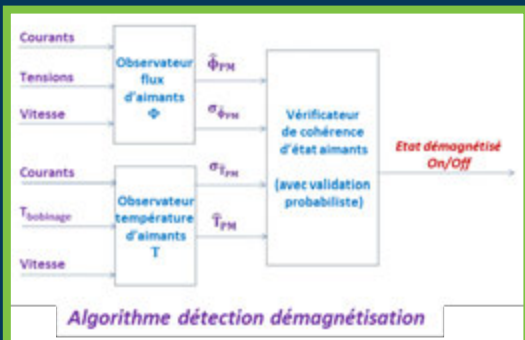
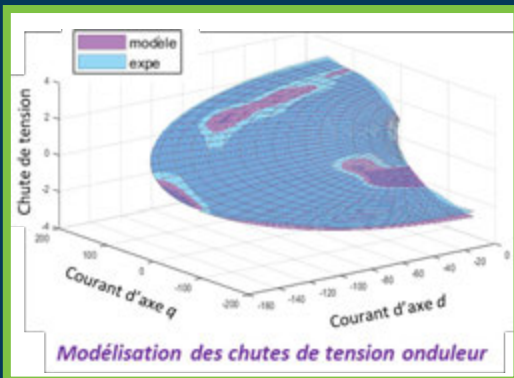
Enrichir le logiciel de contrôle des systèmes de propulsion électrique

Problématique et axes de recherche

Bien que les systèmes de propulsion électrifiés bénéficient déjà de rendements très élevés, l'augmentation nécessaire des densités massique et volumique de couple et de puissance, sous la contrainte de coûts de production et d'impact environnemental limités, les soumettent à rude épreuve. De plus, l'augmentation des sollicitations mécaniques, électriques et thermiques subies par les électroniques et les moteurs peut remettre en cause leur fiabilité. Dans ce cadre, le logiciel de contrôle joue un rôle essentiel : il estime précisément leur état en cours de fonctionnement, afin d'en assurer la protection et le diagnostic le cas échéant.

En 2022, les axes de recherche du Carnot IFPEN TE ont porté sur :

- l'amélioration de la modélisation thermique et électrique des systèmes moteur/onduleur, soutenue par des caractérisations et validations expérimentales dédiées ;
- le développement d'algorithmes de diagnostic en ligne des états thermique et magnétique du système de propulsion, afin d'éviter la surchauffe et/ou la démagnétisation des aimants.



LES RÉSULTATS OBTENUS

Élaboration de modèles

Le Carnot IFPEN TE a développé de nouveaux modèles du comportement électrique des onduleurs, en se concentrant sur les chutes de tension observées à leurs bornes. En effet, ces dernières sont révélatrices de la santé des composants de puissance. Une nouvelle méthode expérimentale automatisée a été exploitée pour confronter les modèles à la réalité sur une large plage de fonctionnement, pour des onduleurs de technologie IGBT et SiC.

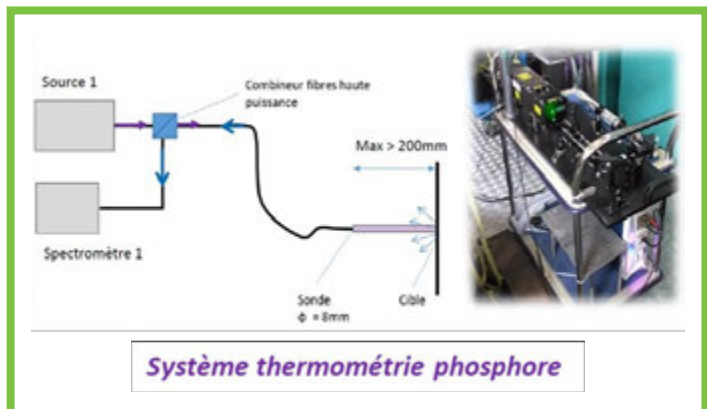
Mise en place d'une méthode de mesure innovante

Le Carnot IFPEN TE a également développé une méthode de mesure à distance par thermométrie phosphore de la distribution spatiale et temporelle de température des aimants dans les rotors de moteurs, qui sont difficilement accessibles. Grâce à cette mesure riche et peu intrusive, il est possible de corriger et valider les modèles thermiques précédemment développés sans recourir à des essais spécifiques chronophages.

Développement d'un estimateur de flux magnétiques

Les caractéristiques magnétiques des aimants permanents varient selon leur température et sont également dégradées en cas de surchauffe. Pour cette raison, les équipes du Carnot IFPEN TE ont développé en premier lieu un estimateur des flux magnétiques des moteurs, via une approche innovante connue sous le nom de « Filtre de Kalman sans parfum », bien adaptée au système complexe qu'est le moteur électrique.

Dans un second temps, en utilisant une méthode en rupture détectant une incohérence entre cette estimation des flux et l'évaluation indépendante de la température des aimants, un algorithme de diagnostic de démagnétisation a été mis point, permettant une détection 3 fois plus précoce qu'en standard.





Améliorer le rendement des moteurs thermiques par l'allumage de mélanges dilués dans des préchambres actives

Problématique et axes de recherche

En parallèle de ses travaux de développement de systèmes de combustion à carburant gazeux décarboné, tels que biogaz ou hydrogène, le Carnot IFPEN TE a continué à optimiser le rendement des systèmes de combustion de la dernière génération des moteurs à essence. Ils seront utilisés dans des chaînes de traction très fortement électrifiées, permettant d'atteindre des consommations finales d'utilisation extrêmement basses. En 2021 le potentiel de l'approche des mélanges très fortement dilués à l'EGR allumés grâce à des préchambres actives prémélangées a été démontré. En 2022, le système de combustion global, incluant la préchambre et la chambre de combustion principale, a été optimisé par calculs de dynamique des fluides 3D. Les axes d'investigation ont porté particulièrement sur l'allumage multisite dans la chambre de combustion. Les résultats ont montré que les multiples jets de flamme éjectés de la préchambre réduisent fortement le besoin en turbulence pour la propagation du front de flamme, et ce malgré l'utilisation de mélanges très fortement dilués à l'EGR. Par conséquent, une optimisation de l'admission du système de combustion est envisageable pour un meilleur couplage avec la préchambre. En ce qui concerne la préchambre elle-même, une optimisation de son design est nécessaire pour améliorer son efficacité globale.

LES RÉSULTATS OBTENUS

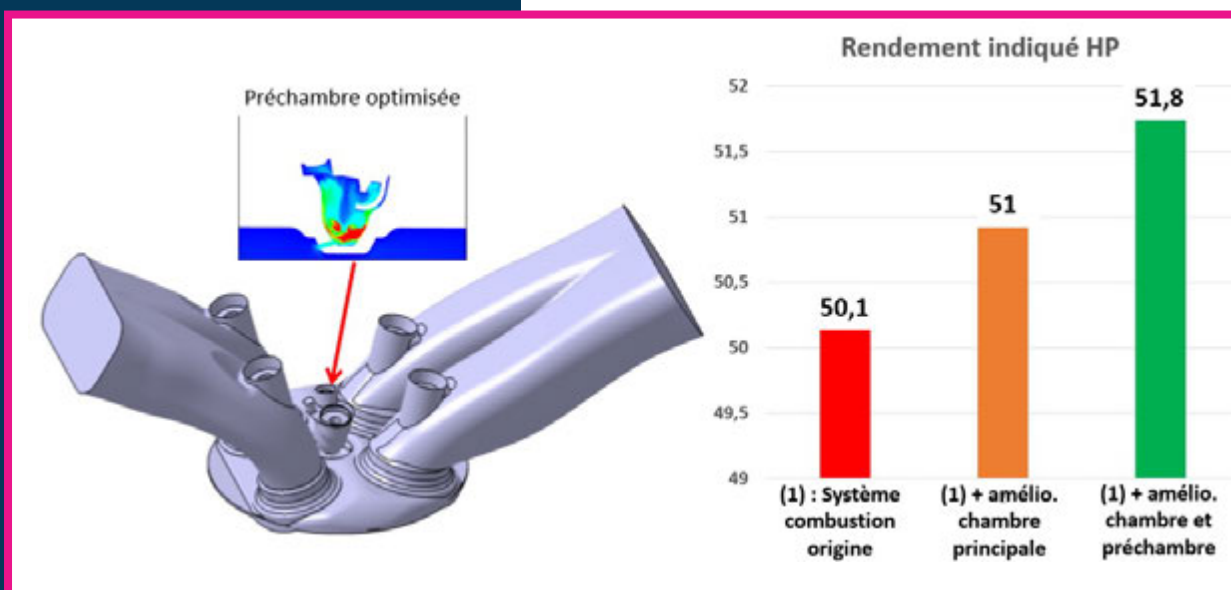
Amélioration du design du système d'admission

La première étape des travaux a donc consisté à optimiser par calculs CFD 3D le design du système d'admission du moteur. Ces calculs ont montré qu'il était possible de diminuer de 20 % les niveaux de turbulence produits dans le cylindre sans affecter le déroulement de la combustion, même avec des très forts taux de dilution grâce aux multiples jets de flamme éjectés de la préchambre. La diminution de ce besoin en turbulence permet de diminuer fortement les contraintes sur le dessin des conduits d'admission du cylindre et ainsi d'en améliorer le remplissage de l'ordre de 15 %, au bénéfice du fonctionnement de la boucle d'air du moteur, donc de ses prestations globales et de son rendement.

Optimisation des caractéristiques du dessin de la préchambre

En parallèle, d'importants postes de pertes de rendement ont été identifiés dans la préchambre elle-même du fait de son dessin initial : surfaces mouillées importantes impliquant de fortes pertes thermiques, importantes dissipations de la turbulence et au final un point d'allumage dans la préchambre défavorablement positionné du fait des contraintes. La conséquence en est une phase de combustion dans la préchambre et, par la suite, d'expulsion des jets, perfectible. Les calculs CFD 3D ont permis d'optimiser l'ensemble des caractéristiques du dessin de la préchambre (volume, compacité, forme et nombre des trous d'éjection, positionnement du point d'allumage), aboutissant à une nette amélioration des postes de perte identifiés précédemment.

L'optimisation du système complet chambre principale plus préchambre active offre un gain de 1,7 % de rendement indiqué HP, pour culminer à 51,8 % en sortie calculs 3D.





Utiliser l'hydrogène comme carburant dans une motorisation thermique

Problématique et axes de recherche

Réduire les émissions de CO₂ du transport routier implique de recourir à des vecteurs énergétiques neutres en carbone (carburant et/ou électricité renouvelables). Or, l'électrification seule ne peut répondre à tous les besoins. Dans le cas de la mobilité lourde notamment, les carburants neutres en carbone, comme l'hydrogène ou le biogaz, constituent une alternative. L'utilisation optimale de l'hydrogène doit prendre en compte les spécificités de ce carburant gazeux et nécessite des travaux de compréhension et des développements spécifiques.

En 2022, les travaux se sont focalisés sur la combustion de l'hydrogène dans les moteurs thermiques, qui présente des différences significatives par rapport à celle des carburants conventionnels. Les principaux verrous du système de combustion de l'hydrogène doivent donc être adressés afin d'adapter l'assemblage technologique des motorisations. En particulier, le cahier des charges du système d'injection, le compromis rendement/émissions d'oxydes d'azote (NOx) et les combustions anormales doivent être étudiés expérimentalement au banc moteur et numériquement par de la modélisation 3D.

LES RÉSULTATS OBTENUS

Développement d'un système de combustion intégrant une injection directe d'hydrogène

Les résultats obtenus mettent en avant l'importance de l'optimisation du mélange hydrogène/air pour contrôler à la fois les émissions de NOx et les combustions anormales et pour maximiser le rendement. Les systèmes de combustion natifs allumage commandé à fort niveau d'aérodynamique interne sont très pertinents pour fonctionner à l'hydrogène, y compris pour les applications poids lourd et *off road*. Dans ce contexte, les équipes du Carnot IFPEN TE ont développé à l'aide de la modélisation 3D un système de combustion à fort niveau de tumble, intégrant une injection directe d'hydrogène pour un moteur d'une cylindrée unitaire de 2,1 L.

Les principaux paramètres d'optimisation étudiés sont : le niveau d'aérodynamique (via la forme des conduits d'admission), le positionnement et l'inclinaison du jet d'hydrogène (via le design injecteur), la position de la bougie (Figure 1). Les critères d'évaluation portent sur l'homogénéité du mélange air/hydrogène et sur le niveau de turbulence au moment de l'allumage (Figure 2).

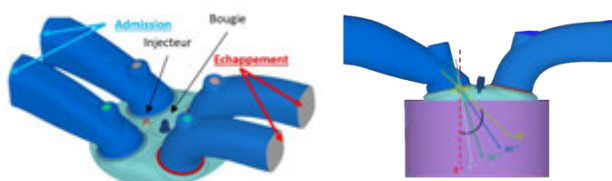


Figure 1 : Paramètres d'optimisation du système de combustion hydrogène

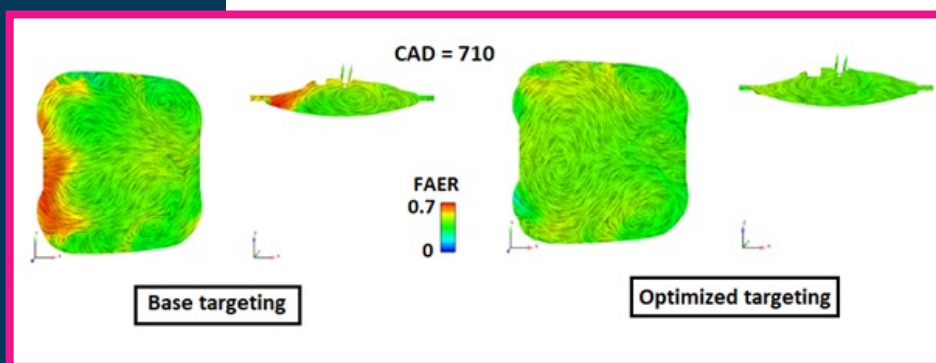


Figure 2 : Distribution de richesse H₂/air dans la chambre de combustion
Gauche : injecteur de référence, Droite : injecteur optimisé

Fabrication d'une nouvelle base monocylindre

Afin de se doter d'un nouvel outil de recherche adapté aux applications poids lourds et *off road*, une nouvelle base monocylindre a été conçue et fabriquée. Le moteur a été assemblé et monté sur l'un des bancs d'essais du Carnot, pour une campagne de tests prévue en 2023.



Dépolluer les moteurs utilisant de l'hydrogène

Problématique et axes de recherche

Les objectifs de décarbonation de la mobilité terrestre associés aux futures normes, telle que la norme Euro 7, induisent des contraintes particulièrement fortes sur les performances des systèmes de dépollution des véhicules à motorisation thermique. Si l'utilisation de l'hydrogène pour alimenter des motorisations thermiques répond aux exigences CO_2 , elle engendre des émissions d'oxydes d'azote (NO_x) en sortie moteur lors des phases transitoires. Le traitement des NO_x est donc particulièrement important à étudier avec une activation nécessaire dès le démarrage du moteur, et une haute sélectivité des réactions afin d'éviter la formation d'espèces indésirées comme le protoxyde d'azote (N_2O) dont le pouvoir de réchauffement global est très élevé.

Le premier axe de recherche concerne la solution SCR (*Selective Catalytic Reduction*) avec l'hydrogène comme réducteur qui peut présenter un intérêt pour les moteurs à combustion hydrogène. Il s'agit d'identifier des matériaux à base de métaux précieux (Pt,Pd) associés à certains métaux de transition. Le deuxième axe porte sur l'amélioration de la sélectivité en NH_3 -SCR en évaluant différentes structures zéolithiques selon un critère sélectivité/performances dans la continuité des travaux engagés depuis 2021.

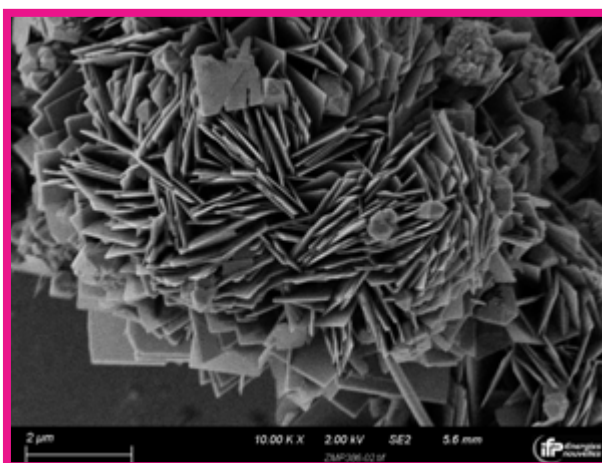
LES RÉSULTATS OBTENUS

Évaluation de l'activité catalytique

La réduction des NO_x avec l'hydrogène comme réducteur a été investiguée par le Carnot IFPEN TE sur des métaux nobles supportés dans la continuité des travaux de 2021. Les catalyseurs H_2 -SCR à base de métaux nobles présentent, lorsqu'ils sont efficaces vers 100°C , des émissions importantes de composés indésirables tel que le N_2O . Les travaux ont consisté à synthétiser à l'échelle du laboratoire une grande variété de matériaux à base de métaux nobles (associés ou non à des métaux de transition), sur des supports tels que l'alumine ou l'oxyde de titane. L'activité catalytique a été évaluée en laboratoire au moyen d'un banc d'essais à lit fixe. L'évaluation a mis en évidence l'intérêt de rajouter un métal comme le nickel ou le cuivre pour améliorer la sélectivité tout en diminuant la quantité de métal précieux.

Mise en évidence de l'impact de différentes structures zéolithiques sur la sélectivité

Le second axe de recherche, à savoir l'amélioration de la sélectivité en NH_3 -SCR, a conduit le Carnot IFPEN TE à se focaliser sur des zéolithes échangées au fer. Celles-ci sont efficaces dans la gamme de température 250 - 500°C et limitent les émissions de N_2O . L'étude laboratoire, réalisée sur des tests catalytiques en lit fixe, a permis de mettre en évidence l'impact de différentes structures zéolithiques sur la sélectivité. Les performances constatées ont montré que les structures de type Nu-86 et FER présentaient les meilleures performances DÉNO $_x$ avec des niveaux d'émissions très faibles de N_2O . La structure de type AFX, si elle offre des performances de conversion des NO_x légèrement moins élevées en termes d'amorçage que le fer, n'en est pas pour autant dénuée de tout intérêt car elle offre un niveau minimum de N_2O et une exceptionnelle tenue hydrothermale à très haute température (900°C).



Cliché MEB (Microscopie Electronique à Balayage) de cristaux de zéolithe de structure FER synthétisés à IFPEN



Améliorer la technologie pour mieux diagnostiquer la qualité de l'air

Problématique et axes de recherche

La qualité de l'air est plus que jamais une problématique sociétale et de santé publique majeure. Le Carnot IFPEN TE contribue par des travaux de recherche au développement de l'innovation dans ce domaine. Or les solutions de remédiation (voir page 18) doivent impérativement s'appuyer sur un diagnostic, et donc une mesure précise et exhaustive sur des gaz bruts (au point d'émission) ou dilués (dans l'air que nous respirons). Dans ce cadre, les objectifs de ce projet ont évolué, pour rendre la technologie UV plus exhaustive et, à terme, plus simple à calibrer et à généraliser. Ceux-ci sont développés sous la forme des deux axes de recherche suivants :

- la poursuite de la caractérisation et l'intégration de nouvelles molécules d'intérêt (indicateurs de combustion, molécules soufrées, hydrocarbures aromatiques), ainsi que leur prise en compte en temps réel dans une matrice de gaz réels ;
- l'instruction d'une alternative purement digitale au traitement chimiométrique des spectres obtenus dans l'UV par *deep learning*.

LES RÉSULTATS OBTENUS

Si le développement du concept de mesure des gaz polluants dans le domaine de l'UV au sein du Carnot IFPEN TE s'est opéré à la faveur de besoins prégnants pour les sources mobiles, sa pérennité se trouve dans la mesure des gaz industriels. En effet, qu'il s'agisse de gaz émis à la cheminée, de gaz de process intermédiaire ou de produits gazeux finaux (biométhane par exemple), il est nécessaire pour l'amélioration de l'efficacité des unités et la diminution des rejets nuisibles dans l'atmosphère, d'avoir un système de suivi du process et des émissions universel et fiable.

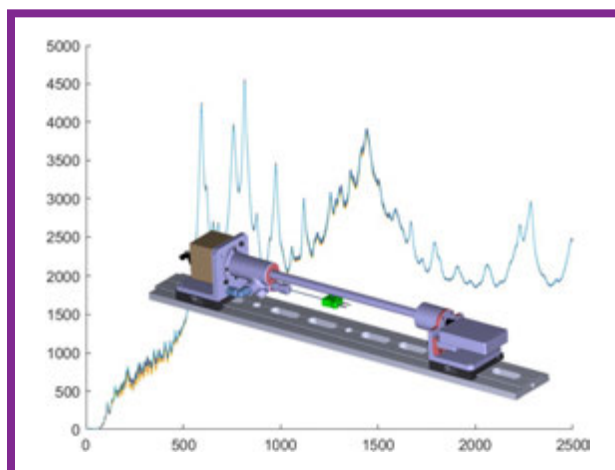
Ces deux points ont été adressés en 2022, en combinant des approches digitale et expérimentale.

Mise en place d'une plateforme de tests numériques et élargissement des indicateurs

Dans un premier temps, pour élargir le spectre des molécules détectables par notre système de mesure, une plateforme de tests numériques a été créée. Cette dernière permet, à partir de spectres théoriques de molécules pures issus de la littérature, de créer des spectres composites prenant en compte la source de lumière utilisée et le bruit inhérent à notre système physique. Il est donc dorénavant possible, avant de lancer des essais, d'identifier le potentiel et les risques liés à la mesure de cette nouvelle molécule (sensibilité, gamme de concentration, interférences, etc.) et de tester son intégration aux algorithmes chimiométriques préexistants. Cette méthode a permis en 2022 d'agrandir l'offre de notre système à des indicateurs de combustion (O_2 , H_2O) et certains polluants industriels (H_2S , CL_2 , Benzène, Toluène) en complément du panel de gaz déjà caractérisés (NO , NO_2 , NH_3 , SO_2).

Étude de l'apport du *deep learning*

Par ailleurs, la somme de résultats expérimentaux (au laboratoire ou en conditions réelles) accumulés durant le projet a permis de lancer en 2022 une action pour instruire l'intérêt du *deep learning* pour de la mesure de composés gazeux. En effet, ce type d'approche pour partie décorrélée des phénomènes physiques pourrait permettre, à terme, de gagner de la robustesse et du temps de développement.



PROFESSIONNALISATION ET DÉVELOPPEMENT DE PARTENARIATS SOCIO-ÉCONOMIQUES

Engagé auprès de nombreux acteurs industriels (TPE, PME, ETI et GE), le Carnot IFPEN TE les accompagne, au travers d'actions de recherche partenariale, dans leurs programmes R&D ou codéveloppe avec eux des produits et services répondant aux besoins de la mobilité durable.



Machines électriques et électroniques optimisées pour la traction

Le Carnot IFPEN TE poursuit l'accompagnement de ses partenaires industriels dans les phases de développement et validation expérimentale des futures générations de motorisations électriques. De nouvelles méthodologies de mesure ont été conçues et mises en place dans le cadre de l'évaluation de systèmes de refroidissement innovants, ou pour la caractérisation de la tenue mécanique. Les systèmes de pilotage ont été également adaptés pour prendre en compte les nouvelles contraintes imposées par les machines de traction tournant à haute vitesse.

Moyens mis en place

Un moyen d'essais, un prototype et une méthodologie de mesure dédiés à la caractérisation *in situ* de l'écoulement de fluides injectés sur le bobinage ont été déployés afin d'améliorer la compréhension des phénomènes complexes liés au refroidissement direct des parties actives, ainsi que le recalage de modèles thermiques. Un système pour la mesure en temps réel de la déformation d'un rotor d'une machine non conventionnelle a été mis au point et exploité pour identifier les sources de vibration et bruit. Des stratégies de pilotage avancées ont été développées et validées pour assurer la contrôlabilité à haute vitesse des machines fonctionnant à des fréquences électriques élevées.

RÉSULTATS

Caractérisation *in situ* de l'écoulement huile dans une machine électrique

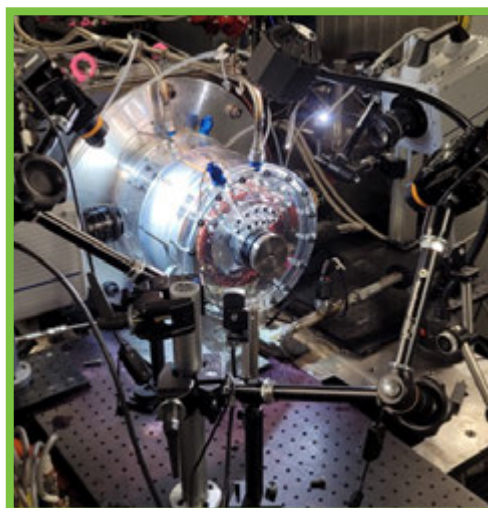
Un prototype avec un carter transparent a été conçu afin de pouvoir observer directement le flux d'une huile de refroidissement injectée à l'intérieur d'une machine électrique. Différentes configurations d'injection ont été testées pour améliorer la compréhension de la répartition de l'huile à l'intérieur de la machine, la formation de film sur le bobinage *hairpin*, et l'impact des propriétés du fluide. Une méthodologie de mesure basée sur l'exploitation de caméras haute résolution et d'algorithmes de post-traitement d'images a permis de créer une base de données disponible pour le recalage des modèles d'injection d'huile, en vue d'une optimisation du design du système de refroidissement.

Mise en place d'une méthodologie de mesure du déplacement axial et de l'élasticité d'un rotor sur une machine à flux axial

Une mesure non-intrusive de la déformation du rotor a été définie en exploitant une technologie de mesure laser par réflexion sur la face du rotor. Cette mesure, réalisée en simultanée sur plusieurs points décalés angulairement, a permis de caractériser les déformations du rotor sur la totalité de son volume. Les résultats obtenus pour différents régimes de fonctionnement et niveaux de charge ont alimenté l'analyse du comportement vibratoire de cette topologie de machine.

Pilotage des machines de traction à haute vitesse

Des stratégies de modulation à largeur d'impulsion (MLI) à haute fréquence, compatibles avec des plateformes hardware conventionnelles, ont été développées pour assurer la montée en fréquence électrique nécessaire au pilotage des machines fonctionnant à haute vitesse, sans imposer des contraintes sur la charge du microprocesseur du convertisseur de puissance. Ces stratégies ont été optimisées selon le point de fonctionnement de la machine électrique.



Caractérisation *in situ* de l'écoulement d'huile dans une machine électrique avec refroidissement direct des parties actives



Mise en place d'une nouvelle transmission pour les VAE

Afin d'accompagner la mise sur le marché de solutions innovantes favorisant le développement de la mobilité douce, le Carnot IFPEN TE a imaginé et conçu, au cours de l'année 2022, une transmission pour vélos à assistance électrique (VAE) visant à simplifier l'expérience de l'utilisateur, de type automatique avec suppression du dérailleur et de la cassette de pignons.

Moyens mis en place

De nombreux échanges avec les acteurs nationaux ainsi qu'une enquête auprès des utilisateurs ont fait apparaître un besoin non couvert à ce jour : l'adaptation automatique du rapport engagé, qui offrirait une véritable avancée et permettrait de démocratiser l'utilisation du vélo.

Le Carnot IFPEN TE a donc imaginé plusieurs solutions pouvant répondre à cette demande. La solution retenue et développée est celle qui présente le meilleur compromis en termes d'encombrement, de masse et de coût.

RÉSULTATS

De l'idéation jusqu'au concept breveté

La démarche du Carnot IFPEN TE a consisté à explorer en parallèle plusieurs technologies de transmission (variation continue, boîte de vitesses séquentielle, etc.), plusieurs implantations possibles (au niveau du pédalier, de la roue avant ou arrière), avec ou sans récupération d'énergie. Chaque concept a ensuite été étudié, confronté au marché, à la législation en vigueur et à de potentiels partenaires industriels. Il ressort de cette démarche un premier concept et la rédaction du cahier des charges associé.

Les valeurs obtenues via le modèle CAO, d'un point de vue masse, encombrement, ont confirmé que le concept était pertinent pour une application VAE.

À noter : le concept imaginé et développé par le Carnot IFPEN TE a fait l'objet d'un dépôt de brevet au cours de l'année 2022, ce qui valide la nouveauté de la solution développée.

La réalisation d'un premier démonstrateur, prévu au cours du premier semestre 2023 va permettre de rencontrer les industriels du secteur afin de mettre en place des collaborations visant à transformer le concept breveté par le Carnot IFPEN TE en innovation, et pouvoir ainsi le valoriser.





Optimisation de la mise en œuvre des piles à combustible à bord des véhicules

Les travaux menés par le Carnot IFPEN TE visent à :

- construire des simulateurs de systèmes pile à combustible (PàC) – cœur de pile et auxiliaires – et de véhicules à PàC avec leurs 2 sources d'énergie électrique (PàC et batterie) ;
- développer des algorithmes de contrôle-commande de ces systèmes, à l'échelle de la PàC (gestion des auxiliaires permettant le fonctionnement du cœur de pile) et à celle du véhicule (gestion énergétique) ;
- mettre au point des méthodologies d'essais pour l'expérimentation des PàC et des véhicules à PàC.

Moyens mis en place

Les simulateurs ont été mis en place sur la plateforme Simcenter Amesim®. Leur paramétrage a bénéficié des retours d'expérience issus des campagnes d'essais menées par les équipes du Carnot IFPEN TE sur des systèmes commerciaux (pile Ballard, véhicules à PàC Hyundai et Toyota). Les premiers algorithmes de contrôle ont été développés avec Matlab et testés en cosimulation avec Amesim. Des méthodes d'essais ont été mises au point sur le banc de test PàC et au banc à rouleaux, sur véhicules à hydrogène.

RÉSULTATS

En simulation

Des simulateurs ont été développés pour des véhicules de type poids lourd long-routier, bus urbain articulé ou autocar longue distance : autant de véhicules difficiles à servir avec des batteries. Leur consommation d'hydrogène sur différents profils d'usage et le dimensionnement optimal du groupe motopropulseur (PàC + batterie) ont pu être déterminés.

Développements contrôle :

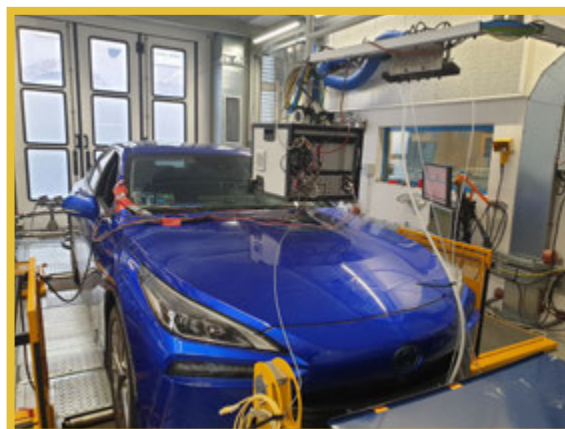
Le contrôle énergétique d'un système équipé d'une PàC et d'une batterie a été mis en place. Il gère la répartition de la demande en puissance « à la roue » entre la PàC et la batterie, en tenant compte de l'état de charge de la batterie et de la minimisation de la consommation d'hydrogène. Ce contrôle est prédisposé pour intégrer, à terme, des contraintes limitant le vieillissement prématuré de l'ensemble « PàC & batterie ».

Résultats expérimentaux

La PàC commerciale Ballard MD30 a été caractérisée au banc d'essais. La caractérisation a porté sur le volet énergétique (consommation d'hydrogène, consommation des auxiliaires, flux thermiques), le contrôle (gestion des arrêts/démarrages) et les émissions d'H₂ (phases de purge anodique).

Un véhicule Toyota Mirai 2 a été analysé au banc à rouleaux : évaluation de la consommation d'hydrogène selon 3 méthodes (la mesure directe aurait nécessité la modification du circuit H₂ du véhicule, interdite ici pour des raisons de sécurité) et quantification des flux d'énergie électrique entre les différents sources et consommateurs à bord.

L'ensemble de ces résultats offrent aux équipes du Carnot IFPEN TE une base d'outils (simulateurs, contrôle) et de méthodologies expérimentales pour pouvoir dialoguer et enclencher des collaborations avec les acteurs socio-économiques du secteur des PàC et des véhicules les utilisant. En effet, le Carnot dispose désormais d'une expertise lui permettant de faire des prédimensionnements de PàC et de prédire les besoins énergétiques de différents types de véhicules en fonction des usages ciblés.





Évaluation d'un système ITS pour la sécurité des cyclistes à Bordeaux

Dans le cadre de la réduction des impacts environnementaux liés à la mobilité, un défi majeur consiste à optimiser l'infrastructure routière en mettant en place des aménagements cyclables permettant une cohabitation harmonieuse des différents modes de transport. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel de modéliser la mobilité sur un territoire donné. Dans ce contexte, l'action réalisée vise à évaluer, par le biais d'une simulation dynamique, un système ITS (Intelligent Transport System) de gestion de carrefour à feux optimisé pour les cyclistes.

Moyens mis en place

En collaboration avec Clim'adapt, le Carnot du Cerema, la démarche s'est articulée en trois étapes. Tout d'abord, il était nécessaire d'identifier une intersection à Bordeaux où de nombreux accidents se produisent, et où l'intégration de feux communicants pour les cyclistes constituerait une solution adaptée. Ensuite, un recueil de données de flux de déplacement en véhicule léger et à vélo a été effectué sur cette même zone géographique afin d'observer les comportements des usagers. Enfin, à partir de ces données recueillies, il a été possible de recalibrer le simulateur SUMO afin d'évaluer, par la suite, différents scénarios.

RÉSULTATS

Identification de journées types

L'analyse des données de comptage des véhicules légers et des vélos recueillies sur l'intersection sélectionnée à Bordeaux a permis d'identifier une journée type pour le recalibrage du modèle de simulation. Ces travaux ont été enrichis en intégrant des données exogènes telles que la météo, permettant de comprendre les causes des fluctuations des flux journaliers et les corrélations entre les deux modes de transport. Des groupes de journées «type» ont ainsi été définis (journées favorables à la pratique du vélo et journées défavorables), ainsi que leur fréquence annuelle, afin de projeter les bénéfices potentiels de l'introduction d'un système de feux connectés sur l'ensemble de l'année. Dans ce contexte, l'action réalisée vise à évaluer, par le biais d'une simulation dynamique, un système C-ITS (*Cooperative Intelligent Transport System*) de gestion de carrefour à feux optimisé pour les cyclistes.

Recalibrage et modélisation des comportements

L'utilisation des données de l'application mobile Geco Air a complété le recalibrage du modèle en fournissant un aperçu du comportement des cyclistes (position sur la chaussée, vitesse à l'approche de l'intersection, etc.), plutôt que de se concentrer uniquement sur les flux. Cela a permis d'obtenir un modèle représentatif des cyclistes dans les simulations.

Evaluation de l'apport des systèmes C-ITS

L'ensemble de ces travaux a permis de mettre en place une méthodologie de recalibrage d'un modèle micro de simulation pour une intersection à Bordeaux, prenant en compte à la fois les déplacements des véhicules légers et des cyclistes. Cela permet d'évaluer l'apport potentiel de systèmes C-ITS, tels que les feux communicants, pour améliorer la sécurité des cyclistes tout en ayant un impact minoritaire sur la fluidité de la circulation.





Modélisation de la mobilité enrichie de données énergétiques

Afin de réduire les impacts environnementaux liés à la mobilité, la modélisation de la mobilité sur un territoire est un atout indispensable pour optimiser les nouvelles offres de transports et les services associés. L'objectif du Carnot IPFEN TE a été de greffer à la modélisation de mobilité sur un territoire le volet énergétique, c'est à dire l'estimation de la consommation d'énergie et des émissions polluantes liées au trafic.

Moyens mis en place

La démarche a consisté dans un premier temps à ajuster l'application de simulation de la mobilité MATSim sur le territoire de la région Île-de-France aux données disponibles issues de l'Enquête Générale Transport, des données de comptage, des applications mobiles, etc. L'objectif étant d'obtenir des déplacements en véhicules motorisés les plus fidèles possible à la réalité. Dans un second temps, à l'aide de l'utilisation d'un parc automobile réaliste, le Carnot IPFEN TE a pu recueillir les émissions de CO₂ liées au transport pour l'ensemble du territoire.

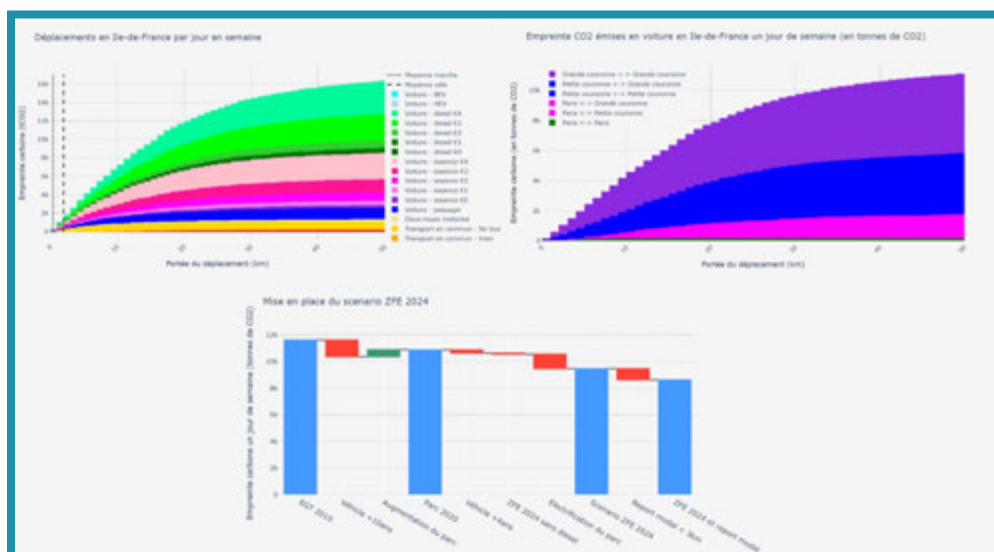
RÉSULTATS

Cohérence des données recueillies

Les premiers résultats par la modélisation de la mobilité via l'outil MATSim ont permis de valider une bonne représentativité des déplacements en véhicules particuliers. La part modale des déplacements ainsi que la distribution des distances en voiture sont relativement similaires aux données de l'enquête générale transport à l'échelle de la région. Quelques différences apparaissent lorsque l'on descend à des échelles géographiques plus locales telles que la commune. D'autre part, les temps de trajets en voiture ainsi que la fréquentation des axes routiers obtenus à l'aide du modèle sont également relativement similaires aux données dynamiques que l'on a pu avoir à disposition (trafic Sytadin, temps de trajet Waze, etc.). Le module d'affectation d'une technologie véhicule à un agent (habitant d'une commune se déplaçant) utilisé a permis d'obtenir une répartition cohérente du parc automobile à l'échelle de la commune suite aux comparaisons effectuées avec des données du Service des Données et Etudes Statistiques. Les résultats globaux obtenus sur les émissions de CO₂ liées aux déplacements des véhicules particuliers rejoignent des chiffres moyens d'émissions du parc automobile urbain à l'échelle nationale.

Définir l'empreinte carbone d'un déplacement

L'ensemble de ces travaux a permis de mettre en place un processus permettant d'obtenir l'empreinte carbone des déplacements des particuliers sur un territoire à l'aide d'un modèle de mobilité. L'utilisation de la simulation permet également d'évaluer des scénarios prospectifs tels que la mise en place de ZFE ou d'autres restrictions. La suite des travaux consistera à améliorer la représentativité géographique à une maille plus fine et à perfectionner des modèles permettant le report de modalité de transport.





Modélisation de la mobilité à l'aide de données de téléphonie

Aujourd'hui, les pouvoirs publics disposent d'outils d'analyse d'impact des mesures de régulation de la mobilité essentiellement fondés sur des approches de modélisation. Ces modèles sont très difficiles à mettre en place et à maintenir. L'objectif du Carnot IFPEN TE a donc été d'analyser, de manière dynamique au cours du temps, la mobilité des personnes et son impact sur les émissions de polluants, à partir de données de bornage téléphonique disponibles sur le territoire.

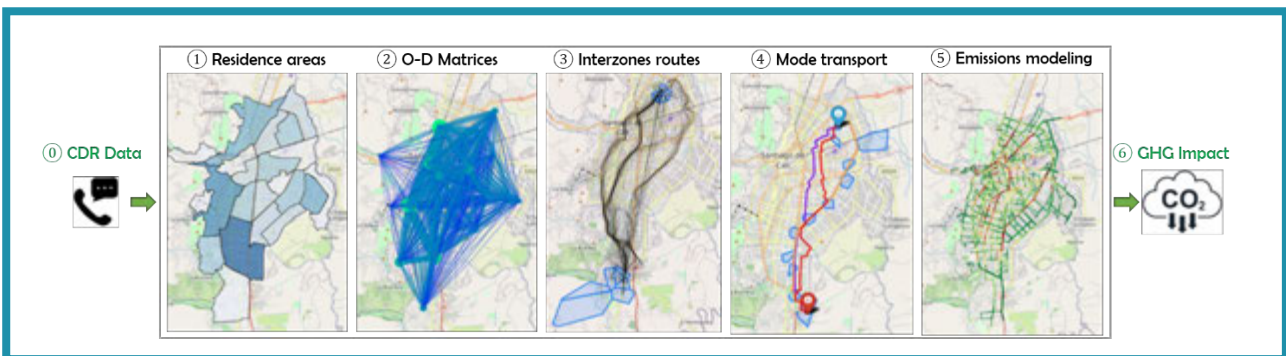
Moyens mis en place

Si les données de bornage téléphonique ont la caractéristique d'être massives, elles présentent une faible précision spatiale et temporelle. Il a donc été indispensable de mettre en place des serveurs de calcul haute performance afin de gérer le volume conséquent d'informations. Ensuite, un workflow de traitement et d'analyse des données brutes a été mis au point afin d'en extraire les informations sur la mobilité : nombre de déplacements, modes de transport associés, émissions liées à la mobilité.

RÉSULTATS

L'analyse des données brutes a permis de comprendre comment convertir des informations simples sur le moment de la communication et la position de l'antenne en séquences de données appartenant à un même déplacement. En regroupant les informations concernant le nombre et la destination des déplacements, le Carnot IFPEN TE a obtenu une représentation des comportements de mobilité de centaines de milliers de personnes au fil du temps, même à une échelle horaire.

Pour mieux comprendre la mobilité sur le territoire, des méthodes de la théorie des graphes ont été utilisées afin de projeter chaque itinéraire observé sur différentes cartes et identifier le mode de transport le plus probable associé au déplacement. Enfin, un modèle d'émissions a été utilisé pour déterminer l'impact carbone et polluant de chaque déplacement avant d'agréger les résultats pour avoir une image de l'impact de la mobilité globale sur le territoire.





Caractérisation précise des émissions sur les territoires

La sensibilité des émissions polluantes aux conditions réelles d'utilisation des véhicules est un facteur crucial à prendre en compte. Ainsi, le Carnot IFPEN TE s'efforce de développer des outils précis et représentatifs pour mieux comprendre l'impact de l'usage réel des véhicules sur les émissions polluantes. Ces nouvelles connaissances sont ensuite utilisées pour identifier les causes de surémissions, mettre en place des actions de réduction des émissions spécifiques à un territoire donné, ainsi que pour recommander des méthodes efficaces de surveillance des émissions de l'ensemble du parc de véhicules.

Moyens mis en place

La méthodologie déployée couple la mesure embarquée des émissions en usage, des outils de modélisation microscopiques des émissions et des outils de collecte et d'analyse de données d'usage réel à grande échelle. Les équipes du Carnot ont focalisé les actions 2022, dans la continuité des actions menées les années précédentes, sur l'enrichissement de ces briques et sur la multiplication des expérimentations.

RÉSULTATS

Des expérimentations sur véhicules légers avec l'outil de mesure embarquée des émissions REAL-e, développé par le Carnot IFPEN TE en partenariat avec la PME Capelec, ont montré qu'un essai court en conditions réelles permet de caractériser quantitativement les émissions d'un véhicule et que son déploiement à grande échelle permettrait d'identifier et d'agir sur les véhicules les plus émissifs. Davantage de données incluant des véhicules défaillants seront nécessaires pour affiner les constats établis en 2022. Les domaines du réseau d'entretien et du reconditionnement de véhicule d'occasion sont visés pour ce changement d'échelle. Trois nouveaux exemplaires de l'outil Real-E ont été produits en 2022 afin de multiplier les expérimentations. De premiers essais ont eu lieu sur poids-lourds et se poursuivront en 2023. De plus, les deux-roues motorisés feront l'objet d'expérimentations avec Real-E dans le cadre du projet européen LENS à partir de 2023.

Cette caractérisation expérimentale alimente une chaîne d'outil opérationnelle (des modèles d'émissions microscopiques sont calibrés sur les données expérimentales et déployés sur les données d'usage), qui permet l'analyse des couples usages/technologies critiques sur les territoires et l'évaluation de scénarios prospectifs d'évolution du parc, des usages ou des réglementations.

LE SAVIEZ-VOUS ?

Sur la base des usages mesurés cette année par l'application Geco air, la restriction au parc Crit'Air 1 et Crit'Air 2 en Ile-de-France aurait permis en 2021 une réduction des émissions des véhicules particuliers de 12 % pour le CO₂ et de 57 % pour les NO_x.



UNE DYNAMIQUE EUROPÉENNE

Dans le cadre de leurs travaux de recherche, les équipes du Carnot IFPEN Transports Energie sont engagées dans plusieurs projets soutenus par l'Union européenne, notamment dans le cadre des programmes Horizon 2020 et Horizon Europe. Elles contribuent ainsi au développement de la R&I européenne pour une mobilité durable.

L'année 2022 a été marquée par l'obtention de résultats très positifs dans les projets européens auxquels les équipes du Carnot TE prennent part.

Concernant la propulsion électrique des véhicules, **CEVOLVER** (*Connected Electric Vehicle Optimized for Life, Value, Efficiency and Range*), dont le Carnot IFPEN TE est partenaire, s'est également achevé après quatre ans de travaux. Des résultats concluants en termes d'usage des véhicules électriques ont été présentés (voir page 9).

Concernant les nouvelles générations de batteries, le projet **Modalis2** (*Modelling of Advanced li Storage Systems*), piloté par le Carnot IFPEN TE et réunissant 10 partenaires, modélise les batteries à base de matériaux nouveaux tels que des alliages avec du silicium pour les électrodes négatives ou des électrolytes solides. Les avancées du projet ont été présentées à Bruxelles lors de la conférence H2020RTR, organisée par la Commission européenne et les instances européennes ERTRAC, EGVIafor2Zero et CCAM.

Concernant l'amélioration de la chaîne de traction des poids lourds, l'assemblée générale du projet **LongRun** (*Development of efficient and environmental friendly LONG distance powertrain for heavy duty trucks and coaches*) s'est tenue en juin sur le site de Rueil-Malmaison. Elle a rassemblé plus de 70 participants, représentant les 30 partenaires du consortium, et a permis de présenter les principales avancées.

Sur des thématiques telles que les véhicules hybrides à faibles émissions de polluants et consommation de carburant réduite, le projet **PHOENICE** - *PHev towards zero EmissionNs & ultimate ICE efficiency* s'est poursuivi, laissant entrevoir des résultats probants en termes de réduction de consommation et de polluants.

La dynamique se renforce dans le cadre d'Horizon Europe avec notamment le projet **HELENA** sur les batteries du futur lancé en 2022 et le verdissement des ports et des aéroports (projets **OLGA**, **MAGPIE**).

Soutenu par un fonds de recherche et innovation danois et associant plus d'une dizaine de centres de recherche et d'universités européennes, le projet **LowCarbFuels** cherche à promouvoir le développement de carburants durables par la voie HTL (*Hydrothermal Liquefaction* ou Liquéfaction hydrothermique). Le Carnot IFPEN TE contribue à la définition des matrices de carburants à étudier, à l'analyse de produits issus du procédé HTL et au test de leur conformité par rapport aux normes de certification dans les domaines aérien et maritime.

Au travers de sa tutelle IFPEN, le Carnot IFPEN Transports Energie est engagé aux côtés de l'industrie et de la recherche académique au sein de l'Alliance européenne sur la recherche en énergie (EERA). Il assure également une présence active au sein d'instances européennes représentatives de la recherche et de l'industrie au niveau européen (EARPA, ERTRAC, EGVIafor2ZERO). Il fait partie de POLIS, réseau de villes européennes, qui soutient le déploiement de technologies et politiques innovantes et durables dans le domaine du transport local et de l'association européenne CCAM (*Connected, Cooperative and Automated Mobility*) regroupant de nombreux acteurs dans le domaine de la mobilité connectée, coopérative et automatisée. Au sein de ces associations, le Carnot IFPEN TE contribue à la définition des orientations de recherche et à la préparation du contenu des appels à projets dans le cadre du programme européen Horizon Europe.



SALONS ET MANIFESTATIONS 2022

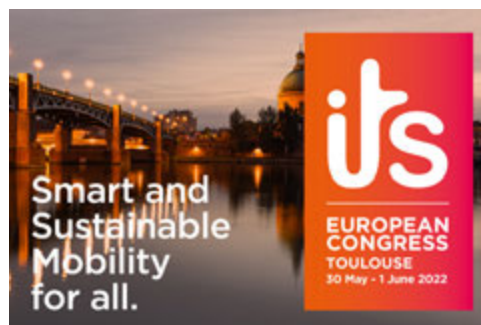
7 avril

Conférence de presse IFPEN :
focus sur la mobilité à Hydrogène



30 mai - 1^{er} juin

ITS European congress, Smart and
sustainable Mobility for all



15-16 juin

SIA Powertrain & Energy



5 juillet

Webinaire Mobilité Hydrogène organisé par
l'association des journalistes de l'environnement

12-13 octobre

RDV Carnot, Paris



18-19 octobre

20 ans EARPA



14 décembre

Club Automobile et mobilité



SÉLECTION DE PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Propulsion électrique

- **Analysis of the impact of end effect and power cable length on the power? Speed characteristics of Six-phase PM-SynRel**

ABDELLI A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), SINDJUI R. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), CHAREYRON B. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), GILSON A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
CISTEM International conference on electrical sciences and technologies in Maghreb 4th, Tunis, Tunisie, 26-28 oct. 2022

- **Experimental separation of No-load losses of an electric motor with direct oil cooling**

BOURHIS G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), SINDJUI R. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), GILSON A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ZITO G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
ICEM International conference on electrical machines 25th, Valence, Espagne, 8-9 sept. 2022

- **A methodology to design hairpin winding for improved thermal performances in a permanent magnet assisted synchronous reluctance motor**

NASRA A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ZITO G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ABDELLI A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), CISSE K.M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
ICEM International conference on electrical machines 25th, Valence, Espagne, 8-9 sept. 2022

- **Evaluation of the magnetic behavior of a single pole pair**

Fe-Cr-Co-based memory motor considering a sandstill magnetization
DOMINGUES DE SOUSA F. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), BATTISTON A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), PIERFEDERICI S. (Univ. Lorraine - France), MEIBODY TABAR F. (Univ. Lorraine - France)
IEEE Transactions on Magnetics, Vol.58, No 8, Août 2022, Article No 8202607
Doi: 10.1109/TMAG.2022.3141895

- **Three-phase bidirectional active split source inverter for automotive traction application**

SABRIE A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), BATTISTON A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), GAUTHIER J.-Y. (INSA-Lyon - France), LIN SHI X. (INSA-Lyon - France)
ELECTRIMACS 14th, Nancy, France, 16-19 mai 2022

- **Experimental study of systems and oils for direct cooling of electrical machine**

SINDJUI R. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ZITO G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ZHANG S. (TotalEnergies - France)
Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol. 14, No 5, Mai 2022, Article No 051007

- **Rare earth free e-drives featuring low manufacturing cost - ReFreeDrive project summary**

JEZDINSKY T. (European Copper Institute - Belgique), MILOSAVLJEVIC M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), SZILAGYI P. (Breuckmann eMobility - Allemagne)
CWIEME Berlin, Allemagne, 23-25 mai 2022

- **Rare earth-free motors for medium and high-power vehicles**

NUNO F. (European Copper Institute - Belgique), DE WACHTER B. (European Copper Institute - Belgique), NASRA A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), POPESCU M. (Motor Design - Royaume-Uni), FABRI Giuseppe (Univ. Aquila - Italie)
EEMODS International conference on energy efficiency in motor driven 12th, Stuttgart, Allemagne, 3-5 mai 2022

Systèmes électrochimiques et gestion d'énergie

- **Fuel cell behavior and energy balance on board a Hyundai Nexa**

SERY J. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), LEDUC P. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
International Journal of Engine Research, Vol. 23, No 5, Mai 2022, Article No 14680874211059046, pp. 709-720

- **An analytical model to optimize the powertrain sizing of fuel cell hybrid electric vehicles**

CARLOS DA SILVA D. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), KEFSI L. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), SCIARRETTA A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
VPPC Vehicle power and propulsion conference 19th, Merced, États-Unis, 1-4 nov. 2022

- **Machine learning modelling of the state-of-health of lithium-ion cells under calendar aging**

MAIEMBA Q. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), LI A. (Siemens - France), MINGANT R. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DUCRET G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), VENET P. (Laboratoire Ampère - France)
Batteries event 24th, Lyon, France, 18-21 oct. 2022

- **Use of a multiscale/multiphysics approach for Gen 3b Li-ion batteries modelling in a simulation toolchain**

PETIT M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ESNAULT V. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), BIKARD J. (Solvay Saint-Fons - France), ZHAO C. (Solvay Saint-Fons - France), SILVERI F. (Gemmate Tech - Italie), BERTINETTI A. (Gemmate Tech - Italie), MASCHIO L. (Univ. Turin - Italie), DAMBLANC G. (Siemens - France), SELLIER F. (Siemens - France)
ISE Topical meeting 31st, Aix-La-Chapelle, Allemagne, 15-19 mai 2022

- **Modelling electrolyte degradations in aqueous organic flow batteries**

BRIOT L. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), PERA M.C. (Univ. Bourgogne Franche-Comté - France), PETIT Martin (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
EMRS Spring meeting 30 mai-3 juin 2022, Conf. en ligne

- **Aging phenomena and their modelling in aqueous organic redox flow batteries : a review**

BRIOT L. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), PETIT M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), CACCIUTTOLO Q. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), PERA M.C. (Univ. Bourgogne Franche-Comté - France), Journal of Power Sources Vol. 536, Article No 231427
Doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231427

- **A holistic contribution to fast innovation in electric vehicles: an overview of the DEMOBASE research project**

BORDES A. (Ineris - France), DANILOV D. L. (IEK-9 - Allemagne), DESPREZ P. (SAFT - France), LECOCQ A. (Ineris - France), MARLAIR G. (Ineris - France), TRUCHOT B. (Ineris - France), DAHMANI M. (SAFT - France), SIRET C. (SAFT - France), LAURENT S. (SAFT - France), HERREYRE S. (SAFT - France), DOMINGET A. (SAFT - France), HAMELIN L. (SAFT - France), RIGOBERT G. (SAFT - France), BENJAMIN S. (SAFT - France), LEGRAND N. (SAFT - France), MAURER W. (Infineon - Allemagne), PETIT M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), MARTIN J. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), BERNARD J. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
eTransportation Vol. 11, Fev. 2022, Article No 100144
Doi: 10.1016/j.etrans.2021.100144

Propulsion hydrogène et bas carbone

- **A comprehensive study for the identification of the requirements for an optimal H2 combustion engine**

LAGET O. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ROULEAU L. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), CORDIER M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DUFFOUR F. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), MAIO G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), GIUFFRIDA V. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), KUMAR R. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), NOWAK L. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
COMODIA International conference on modeling and diagnostics for advanced engine systems - 10th, Sapporo, Japon, 5-8 juil. 2022

- **Retrofitting a diesel baseline to a fully H2 spark ignition engine by combining experiments, OD/1D, and 3D CFD simulations**

MAIO G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), KUMAR R. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ANDRE M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ROULEAU L. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), WALTER B. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), LAGET O. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DUFFOUR F. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DOBER G. (Borgwarner - Luxembourg), DORADOUX L. (Borgwarner - France), LESIEUR C. (Borgwarner - France), SHI J. (Borgwarner - Luxembourg)
Aachen colloquium sustainable mobility 31st, Aix-La-Chapelle, Allemagne, 9-11 oct. 2022

• **Experimental and numerical investigation of a direct injection spark ignition hydrogen engine for heavy-duty applications**
 MAIO G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), BOBERIC A. (RWTH - Allemagne), GIARRACCA-MEHL L. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), AUBAGNAC-KARKAR D. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), COLIN O. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DUFFOUR F. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DEPPENKEMPER K. (FEV Europe - Allemagne), VIENICH L. (FEV Europe - Allemagne), PISCHINGER S. (FEV Europe - Allemagne)
 International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No 67, pp. 29069-29084
 Doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.184

• **Numerical assessment of ozone addition potential in direct injection compression ignition engines**
 GIUFFRIDA V. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), BARDI M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), MATRAT M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ROBERT A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), PILLA G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
 International Journal of Engine Research Vol. 23, No 1, pp. 33-48
 Doi: 10.1177/1468087420973553

• **Phoenix : HEV towards zero emissions & ultimate ice efficiency**
 TAHTOUH T. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), BRIGNONE M. (Marelli - Italie), CLEETON J. (Johnson Matthey - Royaume-Uni), DEMEILLIERS N. (In Extenso Innovation Croissance - France), LUCIGNANO G. (Stellantis - France), MILLO F. (Politecnico Milano - Italie), PERAZZO A. (FEV group - Allemagne), CASTELLANOS J.S. (Garrett Motion - États-Unis)
 CO₂ reduction for transportation systems conference, Turin, Italie, 21-22 juin 2022

• **Real- fluid effects of primary methanol fuel on dual-fuel injection and mixing**
 GABALLA H.H.M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), HABCHI C. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DE HEMPTINNE J.C. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
 ILASS Americas 32nd, Madison, États-Unis, 22-25 mai 2022

Logiciels et solutions pour l'environnement

• **Perspectives for regulating 10 nm particle number emissions based on novel measurement methodologies**

SAMARAS Z. (Univ. Aristotle - Grèce), RIEKER M. (Horiba - Allemagne), PAPAIOANNOU E. (Certh - Grèce), VAN DORP W.F. (Uniresearch - Pays-Bas), KOUSOULIDOU M. (European Climat - Belgique), NTZIACHRISTOS L. (Univ. Aristotle - Grèce), ANDERSSON J. (Ricardo Automotive & Ind - Royaume-Uni), BERGMANN A. (Univ. Tech. Graz - Autriche), HAUSBERGER S. (Univ. Tech. Graz - Autriche), KESKINEN J. (Univ. Tempere - Finlande), KARJALAINEN P. (Univ. Tempere - Finlande), MARTIKAINEN S. (Univ. Tempere - Finlande), MAMAKOS A. (AVL - Autriche), HAISSCH C. (Univ. Tech. Munich - Allemagne), KONTSES A. (Univ. Aristotle - Grèce), TOUMASATOS Z. (Univ. Aristotle - Grèce), LANDL L. (Univ. Tech. Graz - Autriche), BAINSCAB M. (Univ. Tech. Graz - Autriche), LAHDE T. (European Commission - Italie), Piacenza O. (Centro Ricerche Fiat - Italie), Kreutziger P. (Horiba - Allemagne), Bhawe A.N. (CMCL Innovations- Royaume-Uni), LEE K.F. (CMCL Innovations- Royaume-Uni), AKROYD J. (Univ. Cambridge- Royaume-Uni ; CARES - Singapour), KRAFT M. (Univ. Cambridge- Royaume-Uni ; CARES - Singapour; Nanyang Technological Univ. - Singapour), KAZEMIMANESH M. (Univ. Cambridge- Royaume-Uni), BOIES A.M. (Univ. Cambridge- Royaume-Uni), FOCSA C. (Univ. Lille - France), DUCA D. (Univ. Lille - France), CARPENTIER Y. (Univ. Lille - France), PIRIM C. (Univ. Lille - France), NOBLE J.A. (Univ. Lille - France; Horiba Scientific - France), LANCRY O. (Horiba Scientific - France), LEGENDRE S. (Horiba Scientific - France), TRITSCHER T. (TSI GmbH - Allemagne), SPIELVOGEL J. (TSI GmbH - Allemagne), HORN H.G. (TSI GmbH - Allemagne ; Centro Ricerche Fiat - Italie), PEREZ A. (IDIADA SA - Espagne), PAZ S. (IDIADA SA - Espagne), ZARVALIS D. (Certh - Grèce), MELAS A. (European Commission - Italie), BALTZOPOULOU P. (Certh - Grèce), VLACHOS N.D. (Certh - Grèce), CHASAPIDIS L. (Certh - Grèce), DELOGLOU D. (Certh - Grèce), DASKALOS E. (Certh - Grèce), TASKIS A. (Univ. Aristotle - Grèce), Konstandopoulos A.G. (Certh - Grèce ; Univ. Aristotle - Grèce), ZINOLA S. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DI IORIO S. (Istituto STEMS - Italie), CATAPANO F. (Istituto STEMS - Italie), VAGLIECO B.M. (Istituto STEMS - Italie), BURTSCHER H. (Institute for Sensors and Electronics- Suisse), NICOL G. (Centro Ricerche Fiat-Italie), ZAMORA D. (Mobility Ion Technologies SL - Espagne), MAGGIORE M. (European Commission- Belgique)
 Journal of Aerosol Science Vol. 162, Article No 105957, 27 p.
 Doi: 10.1016/j.jaerosci.2022.105957

• **Connected strategy for energy-efficient driving of electric vehicle**
 NGO C. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DE SMET F. (Ford - Allemagne), LEMAIRE O. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), ESPIG M. (Ford - Allemagne), DE NUNZIO G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), SCIARRETTA A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
 SIA Powertrain & energy 34th, Rouen, France, 15-16 juin 2022

• **Driving behavior identification and real-world fuel consumption estimation with crowdsensing data**
 CHATAIGNON A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), MICHEL P. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), RODRIGUEZ RODRIGUEZ S.S. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), CHASSE A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems Vol. 23, No 10, pp. 18378-18391
 • **Connected services for heavy-duty transport: mission profile optimization and impact assessment**
 RODRIGUEZ RODRIGUEZ S.S. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DABADIE J.-C. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), NGUYEN M.Q. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), CORNET C. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), CHEIMARIOTIS I. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), CHASSE A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
 TRA Transport research arena Lisbonne, Portugal, 14-17 nov. 2022

• **Connectivity and automation as enablers for energy-efficient driving and road traffic management**
 OTHMAN B. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DE NUNZIO G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), SCIARRETTA A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), DI DOMENICO D. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), CANUDAS DE WIT C. (Univ. Grenoble - France)
 Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation, Lackner Maximilian, 26 p., ISBN 978-3030725785, 2022

• **Cooperative control in eco-driving of electric connected and autonomous vehicles in an un-signalized urban intersection**
 LAKSHMANAN V.K. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), SCIARRETTA A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), EL GANAOU-MOURLAN O. (IFP School)
 IFAC Papers Online Vol. 55, No 24, pp. 64-71
 Doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.263

• **Eco-driving of compression-ignition vehicles to minimize nitrogen oxide emissions**
 DOLLAR R.A. (Univ. Clemson - États-Unis), THIBAUT L. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), LARAKI M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), SCIARRETTA A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
 IEEE Transactions on Control Systems Technology Vol. 30, No 5, pp. 2084-2099
 Doi: 10.1109/TCST.2021.3133867

• **A bilevel energy management strategy for HEVs under probabilistic traffic conditions**
 LE RHUN A. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), BONNANS F. (Inria - France), DE NUNZIO G. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), LEROY T. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), MARTINON P. (Inria - France)
 IEEE Transactions on Control Systems Technology Vol. 30, No 2, pp. 728-739
 Doi: 10.1109/TCST.2021.3073607

Analyse environnementale des transports

• **Long-haul trucks: hydrogen fuel cell vs. hydrogen internal combustion engine**
 LOSZKA M. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), MARTIN R. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), GUYON O. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), LEDUC P. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), TERNEL C. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
 SIA Powertrain & energy 34th, Rouen, France, 15-16 juin 2022

• **Potential bottleneck in the energy transition: the case of cobalt in an accelerating electro-mobility world**
 SECK G.S. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), HACHE E. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), BARNET C. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE)
 Resources Policy Vol. 75, Article No 102516
 Doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102516

• **Natural gas as a vehicular fuel in Brazil: barriers and lessons to learn**
 LARIZZATTI ZACHARIAS L.G. (Research Center Greenhouse Gas Innovation - Brésil), ANTUNES COSTA DE ANDRADE A.C. (Research Center Greenhouse Gas Innovation - Brésil), GUICHET X. (IFPEN, CARNOT IFPEN TE), MOUETTE D. (Research Center Greenhouse Gas Innovation - Brésil), PEYERL D. (Research Center Greenhouse Gas Innovation - Brésil)
 Energy Policy Vol. 167, Article No 113056
 Doi: 10.1016/j.enpol.2022.113056



Maquette : IFPEN
Mise en page : ExeAtelierTypao
Photos : © Adobe Stock, IFPEN, X. - 2306



RAPPORT D'ACTIVITÉ

2022

INNOVER
LA MOBILITÉ



NOS ÉTABLISSEMENTS

RUEIL-MALMAISON

1 et 4, avenue de Bois-Préau
92852 Rueil-Malmaison Cedex - France

LYON

Rond-point de l'échangeur de Solaize
BP 3 - 69360 Solaize - France

Contact : Gaëtan Monnier

+33 1 47 52 69 16 - gaetan.monnier@ifpen.fr