

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2021

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

- VERS UNE MOBILITÉ ÉLECTRIFIÉE ZÉRO ÉMISSION DE POLLUANTS
- MOBILITÉ CONNECTÉE : DES DONNÉES MUTLI-ÉCHELLES/MULTI-APPLICATIONS
- LA MUTATION DES MOTORISATIONS THERMIQUES

10

GRAND ANGLE :

LES MACHINES ELECTRIQUES : HAUT RENDEMENT ET DENSITE DE PERFORMANCE

12

RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE

19

**PROFESSIONNALISATION ET DÉVELOPPEMENT
DE PARTENARIATS SOCIO-ÉCONOMIQUES**

25

ZOOM SUR : LA FIN DE LA FILIÈRE CARNAUTO

26

OUVERTURE INTERNATIONALE

28

SALONS ET MANIFESTATIONS 2021

29

SÉLECTION DE PUBLICATIONS

LE MOT DU DIRECTEUR



En 2021, pour la deuxième année consécutive, le contexte sanitaire et économique a été difficile. Néanmoins, les équipes du Carnot IFPEN Transports Energie (TE) ont su mener à bien des projets stimulants à la mesure des défis des mobilités de demain de plus en plus électrifiées et connectées et de moins en moins émettrices de polluants et de gaz à effet de serre.

Dans le domaine de l'électrification des véhicules, nous avons consacré nos efforts au développement de nouvelles parties actives plus performantes et déclinables sur une large gamme d'applications : des motorisations de

forte puissance pour des véhicules lourds ou des engins aux motorisations basse tension et basse puissance pour des véhicules légers et économiques. Les différents résultats obtenus dans ce domaine font l'objet du Grand Angle de ce rapport (*voir page 10*).

En matière de mobilité connectée, nous avons poursuivi nos activités pour promouvoir des services permettant de réduire l'empreinte environnementale des transports. Un effort important a été consacré aux données de mobilité et aux outils digitaux relatifs à la qualité de l'air désormais accessibles sous la forme de web services mis à disposition de nos partenaires au travers d'une plateforme dédiée. 2021 a vu émerger le projet Mobility data hub, porté avec les Carnot Inria et Clim'adapt. Objectif : élaborer une plateforme nationale des données de mobilité (*voir page 6*).

Les motorisations à faible impact environnemental ont aussi fait l'objet de travaux décisifs, avec notamment une montée en puissance de la mobilité à l'hydrogène. Deux voies sont à l'étude, la pile à combustible et le moteur à combustion interne fonctionnant à l'hydrogène. Pour accompagner ces travaux, un nouveau banc d'essai destiné à la caractérisation de piles à combustible a été mis en service à Lyon ainsi que trois bancs d'essais de moteurs thermiques à hydrogène.

Un fort esprit d'entreprise anime les équipes du Carnot. C'est ainsi qu'en juillet 2021 a été annoncée la création de TechKare™, start-up qui propose un système innovant d'assistance électrique pour le transport des patients à l'hôpital. Ce dynamisme se retrouve également dans la diversité et l'augmentation des projets de recherche retenus aux niveaux national et européen. En témoigne le nombre de projets collaboratifs dans lesquels nous sommes impliqués (*voir page 26*).

Enfin, en 2021, le projet de filière Carnauto est arrivé au terme de sa mission. Le Carnot IFPEN TE en a été le pilote, œuvrant ainsi à développer la capacité de ses partenaires à répondre au mieux aux besoins de R&I des ETI, PME et TPE du secteur. Carnauto nous aura également permis d'anticiper au mieux les marchés futurs et mettre nos moyens d'essais en phase avec les besoins de R&I des industriels et les sujets émergents. Nous poursuivons cet effort de synergie entre Carnot en nous investissant dans de nombreuses actions inter-Carnot.

Découvrez dans ce compte-rendu de l'année, les différentes facettes et les principaux succès du Carnot IFPEN TE. 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 apporte à ses partenaires industriels des produits et services innovants dans trois domaines : mobilité électrifiée, mobilité connectée et mobilité à faible impact environnemental.

Au sein d'IFPEN, il répond aux défis actuels de la mobilité : évolution des usages appuyée par la digitalisation, amélioration de l'efficacité énergétique, diversification des énergies et réduction des nuisances.

Innover grâce à :

- des solutions répondant aux besoins du marché : systèmes de motorisations électrifiées, services web, systèmes de motorisations thermiques intégrant les carburants bas carbone, systèmes mobiles ou stationnaires de production et de stockage d'énergie et de récupération d'énergie perdue pour le transport ou les installations de petite puissance ;
- des moyens expérimentaux et des outils numériques performants permettant de proposer des innovations à coûts et temps de développement réduits ;
- une politique volontariste de protection industrielle.

Valoriser à travers :

- un accompagnement des filières industrielles sur un champ très large de niveaux de maturités technologiques (TRL 2 à 9) ;
- un transfert de ses résultats R&D via des codéveloppements de produits avec cession de licence d'exploitation, des partenariats stratégiques ou des contrats de recherche collaborative ;
- une politique de soutien de l'innovation, particulièrement auprès des TPE, PME et ETI.

Collaborer avec :

- les entreprises, des start-up, TPE, PME, ETI jusqu'aux grands groupes industriels français et internationaux ;
- les pôles de compétitivité (NextMove, Cara, etc.) ;
- les projets « filières industrielles » Carnot : le Carnot IFPEN Transports Energie est coordinateur de Carnauto pour l'automobile et partenaire d'Aircar pour l'aéronautique ;
- des réseaux de partenaires académiques et des laboratoires de R&D au rayonnement international ;
- les instances européennes représentatives de la recherche et de l'industrie (EARPA, ERTRAC, EGVA, POLIS, CCAM).

Des expertises et compétences de pointe parmi lesquelles :

- modélisation 3D, diagnostics avancés et compréhension de la combustion au système de propulsion quelque soit son énergie ;
- nouvelles technologies de motorisations thermiques et intégration véhicule ;
- stratégies de contrôle, contrôle embarqué et simulation temps réel ;
- aide à la conduite et gestion de flottes de véhicules ;
- traitement du signal ;
- algorithmes d'optimisation, science des données ;
- systèmes de stockage d'électricité ;
- etc.

Le Carnot IFPEN Transports Energie en 2021, c'est :

52 contrats en cours pour un panel de 27 entreprises

30 projets de recherche collaborative auxquels contribuent 176 entreprises partenaires

301 personnes impliquées dans les projets en 2021

Plus de 35 doctorants, dont 1 en thèse Cifre

18 brevets déposés dans l'année et 284 détenus dans le portefeuille de brevets

Une vingtaine de publications de rang A

ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE

Pour répondre aux défis de l'efficacité énergétique des transports, améliorer la performance environnementale des motorisations et diversifier les sources d'énergie vers une mobilité propre et décarbonée, de plus en plus connectée, le Carnot IFPEN Transports Energie articule ses travaux en trois axes au service des entreprises, des collectivités et des citoyens : la mobilité électrifiée, la mobilité connectée et la mobilité à faible impact environnemental.

Focus

En 2021, IFPEN a été choisi pour copiloter avec l'université Gustave Eiffel le programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) sur la digitalisation et la décarbonation des mobilités.



Vers une mobilité électrifiée zéro émission de polluants

Voir page 10 « Les machines électriques : haut rendement et densité de performance »



Mobilité connectée : des données multi-échelles/ multi-applications

IFPEN participe à la décarbonation de la mobilité du quotidien en développant, pour l'État, les territoires, le grand public et les professionnels de la route, des services et des applications connectés capables de mesurer et d'analyser l'empreinte environnementale des transports (CO₂, énergie et polluants) et ainsi d'encourager l'amélioration des comportements. Gecoair™, par exemple, est un outil d'aide à la réduction de l'empreinte environnementale des déplacements qui incite les utilisateurs à se déplacer de manière écoresponsable. Geovelo™ est quant à elle une application de La Compagnie des Mobilités, développée avec le Carnot IFPEN Transports Energie, permettant de favoriser l'usage du vélo. Depuis 2021, les données de mobilités, ainsi qu'un ensemble d'algorithmes et outils digitaux relatifs à la qualité de l'air et à la mobilité connectée, sont accessibles à partir d'une trentaine de web services mis à disposition des partenaires d'IFPEN via la plateforme mobicloud.ifpen.com développée par le Carnot IFPEN Transports Energie.

Fait marquant

Mobility data hub : trois Carnot portent une plateforme nationale des données de mobilité

Inscrire la mobilité dans une trajectoire ambitieuse de décarbonation tout en intégrant les évolutions des comportements impose de mieux connaître, d'analyser, voire de pouvoir prédire les déplacements des personnes et des biens. Les données de mobilité sont alors une ressource clé. Si les grands acteurs du numérique en détiennent une part significative, d'autres acteurs nationaux en possèdent des parts fragmentées fort pertinentes dès lors qu'une synergie peut être créée entre elles.

Aussi, parce qu'il apparaît aujourd'hui nécessaire de créer un tiers de confiance fédérant ces acteurs et capable de traiter ces données, le Carnot IFPEN Transports Energie porte depuis fin 2021 avec le Carnot Inria et le Carnot Clim'adapt (Cerema) l'élaboration d'un Mobility data hub, plateforme nationale des données de mobilité qui ambitionne de doter l'ensemble des acteurs d'outils communs permettant d'une part, de mutualiser les données de mobilité et d'autre part, d'analyser et d'anticiper la mobilité des personnes et des biens.

À noter : le Mobility data hub fait partie des lauréats du programme Propulse de l'Agence de l'innovation pour les transports, annoncés le 17 décembre 2021.



Fait marquant

Modéliser les données de mobilité en Île-de-France

En octobre 2021, le Carnot IFPEN Transports Energie et Paris Ouest La Défense (POLD) ont lancé leur nouveau partenariat collaboratif monté dans le cadre du projet Territoires d'innovation de grande ambition (TIGA) Île-de-France « Construire au futur, habiter au futur ».

Ambition : capter, analyser et modéliser les données de mobilité sur le territoire de Paris Ouest La Défense afin de mieux comprendre et anticiper les déplacements liés au travail. IFPEN construira ses analyses sur la base des données issues notamment de l'application d'écomobilité Gecoair™.



Fait marquant

Data IA : la recherche fondamentale au service de la mobilité 4.0

IFPEN est l'un des 14 membres fondateurs de DatalA : sa participation s'inscrit dans le cadre du verrou 4 de sa stratégie de recherche fondamentale « Traiter de manière optimale les flux massifs de données d'expérimentation ou de simulation » et se matérialise par plusieurs thèses. Une approche collaborative du digital pour évoluer vers une recherche 4.0, au service d'applications telles que l'internet des objets (IoT), l'urbanisation 4.0 et la mobilité, l'optimisation de la production et de la gestion d'énergie et les e-sciences.

DEUX CARNOT ET UNE GAMME D'OUTILS AU SERVICE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Les travaux sur la qualité de l'air, menés conjointement par le Carnot IFPEN Ressources Energétiques et le Carnot IFPEN Transports Energie, bénéficient d'une stimulante association de compétences et de moyens au service des territoires et des collectivités. L'année 2021 a été marquée par la mise à disposition de deux nouveaux outils pour la qualité de l'air dont Real-e™ qui mesure les polluants émis par un véhicule en déplacement (voir ci-dessous). Par ailleurs, l'application d'écomobilité Gecoair™, qui s'adresse aux particuliers, a été renforcée par une fonctionnalité qui permet d'anticiper les aléas climatiques.

Fait marquant

Real-e, l'analyseur mobile et connecté d'émissions véhicules en conditions réelles

Depuis début 2021, le Carnot IFPEN Transports Energie et la PME Capelec, fournisseur d'équipements en contrôle technique automobile, proposent un analyseur mobile et connecté innovant, Real-e™ (Real emissions). Real-e™ mesure, en situation réelle et avec une grande fiabilité, les polluants émis à l'échappement par les véhicules en circulation et permet d'identifier rapidement les véhicules non conformes avec la réglementation. Il se présente sous la forme d'une mallette connectée contenant un analyseur de gaz d'échappement (CO, CO₂, NO_x, PN, NH₃), qui prélève les polluants en continu, et d'un système de diagnostic embarqué qui recueille les paramètres du véhicule. Grâce à ce dispositif, la mise au point des véhicules ou la surveillance d'un parc automobile sont plus simples, plus rapides et moins coûteuses qu'avec les systèmes existants.





La mutation des motorisations thermiques

Dans un contexte où la transition vers les véhicules électrifiés s'accélère, les travaux du Carnot IFPEN Transports Energie dédiés aux motorisations essence visent à accompagner les industriels dans cette évolution.

Des innovations concernant le contrôle de la boucle d'air (système d'alimentation en air et recirculation des gaz brûlés) et/ou le système de combustion sont explorées notamment dans le cadre du projet européen Phoenixe (voir ci-contre). Sur des TRL plus faibles, des études collaboratives, dont le programme européen EAGLE, coordonné par IFPEN et terminé début 2021 (voir rapport Carnot IFPEN TE 2020 p 9), ont permis de situer le potentiel gain en matière de rendement et de réduction d'émissions des motorisations essence. Dans le domaine des motorisations au gaz naturel ou biogaz pour les applications véhicule lourd, le développement de nouvelles motorisations à allumage commandé a commencé et devrait se poursuivre par la caractérisation expérimentale d'un nouveau système de combustion avec des gains en rendement de l'ordre de 10 %. La transition énergétique du secteur fluvial est également soutenue par le Carnot IFPEN Transports Energie.

Fait marquant

Hymot : un démonstrateur pour une offre de véhicules utilitaires décarbonés

Le projet HyMot (moteur à hydrogène) rassemble huit partenaires industriels et académiques parmi lesquels Bosch (coordinateur), Renault, Alpine Racing, Faurecia, OSE Engineering, Total, l'École centrale de Nantes et le Carnot IFPEN Transports Energie. Le projet vise à démontrer la faisabilité de la décarbonation d'un véhicule utilitaire par conversion de son moteur à combustion interne à l'hydrogène, en alternative à une électrification couplée à une pile à combustible hydrogène. Les équipes du Carnot IFPEN Transports Energie apporteront leur expertise récemment consolidée dans le domaine des motorisations thermiques à hydrogène pour concevoir le système de combustion.

Fait marquant

Ofelie : une connaissance des carburants oxygénés approfondie

Coordonné par IFPEN dans le cadre du Carnot IFPEN Transports Energie, le projet ANR Ofelie a été lancé en septembre 2021 pour une durée de trois ans. Le projet, qui réunit des constructeurs automobiles (Stellantis et Renault) et des laboratoires de recherche (PC2A, LRGF) doit permettre de compléter les connaissances sur les phénomènes physico-chimiques liés à l'utilisation croissante de carburants oxygénés.



INTERVIEW DE :

Cécile Cohas,

responsable de la mission recherche innovation, Voies navigables de France (VNF)



Afin de répondre à notre objectif de verdissement des bateaux fluviaux, nous avons demandé à IFPEN de nous accompagner. Cela se traduit par un marché de recherche et développement qui vise à élaborer des scénarios prospectifs de verdissement du bassin Rhône-Saône d'ici à 2050. L'étude réalisée par les équipes d'IFPEN aborde le sujet d'une manière transversale très approfondie. Outre les modélisations techniques, technologiques et économiques des solutions que nous envisageons, elle offre des analyses des cycles de vie essentielles pour compléter les données sectorielles issues de la Commission européenne. À terme, l'objectif est que ces scénarios s'élargissent à l'ensemble des bassins de VNF et se traduisent par la construction de bateaux neufs ou de rétrofit de bateaux. Pour la mise en œuvre et le déploiement de cette réalité sur le terrain, nous aurons encore besoin des équipes d'IFPEN. Je souhaiterais que l'on s'inscrive avec IFPEN dans un partenariat pérenne, à la fois scientifique et technique, qui nous permette de nous appuyer sur un établissement référent pour nos activités.





L'HYDROGÈNE AU CŒUR DE LA TRANSITION DE LA MOBILITÉ

Le Carnot IFPEN Transports Energie travaille sur des solutions permettant d'utiliser l'hydrogène renouvelable ou bas carbone afin de réduire l'impact environnemental de la mobilité :

- hydrogène alimentant une pile à combustible générant de l'électricité embarquée pour les véhicules électriques ;
- hydrogène utilisé comme carburant dans un moteur à combustion interne ;
- intégration d'hydrogène décarboné dans la production de biocarburants avancés, sous forme d'e-biofuels utilisables par les transports lourds (terrestre ou maritime), l'*off-road* et le secteur aérien.

Depuis octobre 2021, les chercheurs du Carnot IFPEN Transports Energie participent au projet ECH2 porté par la société Vitesco Technologies. Objectif : améliorer l'électronique de contrôle des véhicules à pile à combustible hydrogène et faciliter leur déploiement à grande échelle en réduisant leur coût et en augmentant leur durée de vie.

Par ailleurs, un nouveau banc d'essai de systèmes piles à combustible d'une puissance de 210 kW (le plus puissant de France) a été mis en service sur le site d'IFPEN-Lyon.

Fait marquant

Phoenix : vers un véhicule hybride rechargeable zéro émission

Le projet Phoenix (*Phev towards zero Emissions & ultimate ICE efficiency*), coordonné par IFPEN et mené avec sept acteurs industriels et académiques*, a démarré en 2021. Il a pour objectif de développer un démonstrateur de véhicule électrique hybride rechargeable avec un niveau de consommation de carburant et d'émission de polluants réduit. Le Carnot IFPEN Transports Energie interviendra principalement sur la conception des systèmes de combustion basé sur le concept Swumble™ et de post-traitement, la réalisation des moteurs prototypes et la calibration énergétique du moteur multicylindre. Phoenix contribuera 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.

* CRF/FCA (centre de recherche du groupe Fiat), FEV Europe, Johnson Matthey, Marelli Europe, Garrett Motion France, Politecnico di Torino et In Extenso Innovation Croissance.
Ce projet bénéficie d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne H2020 au titre de la convention de subvention 101006841.



LES MACHINES ÉLECTRIQUES : HAUT RENDEMENT ET DENSITÉ DE PERFORMANCE

Dans le cadre de la décarbonation des transports, la mobilité individuelle se transforme pour devenir électrique avec la croissance des ventes de véhicules ZEV (*zero emission vehicle*) et l'avènement du rétrofit. De plus, l'évolution des usages urbains vers des véhicules légers aux besoins en puissance réduits ouvre la voie vers des motorisations basse tension (< 60 Volts), plus simples et économiques. Le Carnot IFPEN Transports Energie contribue à cette transformation et promeut la mobilité zéro émission grâce au déploiement de technologies à faible consommation avec haut rendement énergétique. En 2021, en collaborant au sein d'un écosystème français, il a notamment développé des technologies de motorisation électrique destinées au marché naissant du rétrofit.

Optimiser la conception et le pilotage des machines électriques grâce à un environnement de développement sur mesure

« IFPEN a développé e-MOD Tools (*electric Motors Optimal Design Tools*), une suite logicielle d'optimisation de conception des machines électriques, précise Misa Milosavljevic, chef de projet Motorisations électriques au sein du Carnot IFPEN Transports Energie. L'outil permet de générer un grand nombre de solutions virtuelles en exploitant les capacités du supercalculateur d'IFPEN, puis de proposer un concept conciliant des contraintes multiples : rendement en usage, faisabilité industrielle, usage des terres rares, coût, impact environnemental... Sa finalité est de parvenir au dessin optimal et robuste des parties actives (stator et rotor) pour répondre aux contraintes d'une application industrielle ciblée. La durée nécessaire à la conception d'un nouveau moteur électrique se trouve ainsi largement optimisée : quelques jours suffisent pour avoir un concept bien avancé ! »

Le Carnot a conçu un environnement de développement dédié à la conception et à la validation des lois de commande pour le pilotage des machines électriques, capable de générer de manière automatique le code qui sera intégré dans les électroniques de pilotage (onduleurs). « Cet environnement permet de concevoir et calibrer les algorithmes nécessaires au pilotage précis des machines électriques tournant à haute vitesse, caractérisées par une fréquence électrique élevée, précise Gianluca Zito, chef de projet Motorisations électriques. Les logiciels ainsi mis au point sont embarqués dans une carte de contrôle, intégrée dans tous les onduleurs développés et réalisés par les équipes du Carnot. L'association d'algorithmes performants et de systèmes électroniques compacts caractérisés par des faibles pertes permet d'exploiter le potentiel des machines électriques de nouvelle génération conçues par le Carnot IFPEN Transports Energie ou celles de ses partenaires industriels. »



2021 : L'ESSOR DE SOLUTIONS PERFORMANTES

La dynamique partenariale a également permis de développer une famille de motorisations électriques performantes, intégrant une électronique compacte et une solution originale de refroidissement du moteur. Ces technologies se déclinent sur un large spectre d'applications, du petit véhicule basse tension aux véhicules demandant de fortes puissances.

Pour alimenter ces partenariats et booster la compétitivité du tissu industriel, le Carnot IFPEN Transports Energie a conçu deux nouvelles topologies de machines qui ont fait l'objet de dépôts de brevet. Ces dernières réduisent la consommation de matières premières de 30 % pour des prestations équivalentes à l'état de l'art, grâce à l'amélioration des densités de performances et du rendement en usage sur véhicule.

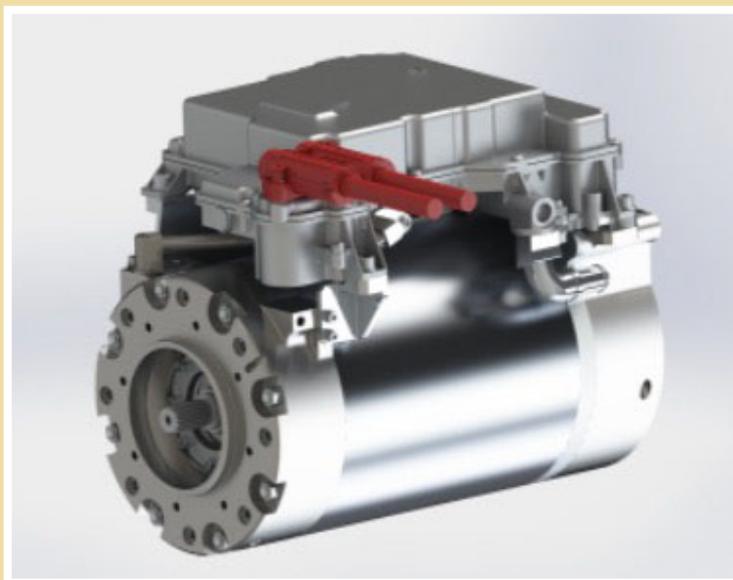
Enfin, l'année 2021 a vu l'aboutissement de deux projets : ReFreeDrive et HERA.

Dans le cadre du projet européen ReFreeDrive, les équipes du Carnot ont développé deux machines électriques sans terres rares (200 et 75 kW), et un onduleur avec des composants à base de carbure de silicium (SiC). L'onduleur a déjà fait l'objet d'une première valorisation.

Le projet HERA, qui s'inscrit dans le cadre de la collaboration avec Punch Powertrain, a vu le développement d'un moteur électrique innovant et son contrôle répondant aux exigences industrielles pour une transmission électrique haute tension (350 V) et moyenne puissance (150 kW) d'un véhicule électrique.

INNOVER AU SEIN D'UN ÉCOSYSTÈME FRANÇAIS

En 2021, le Carnot IFPEN Transports Energie et la PME française EREM ont mutualisé leurs moyens et compétences afin de développer et d'industrialiser des motorisations électriques innovantes pour une large gamme d'applications. Le Carnot apporte à la PME son expertise consolidée par des brevets sur la conception du cœur électromagnétique du moteur électrique ainsi que sur son pilotage. En collaboration avec EREM et Punch Powertrain France, le Carnot IFPEN Transports Energie a ainsi développé et homologué un premier moteur haute tension pour des applications automobiles de retrofit électrique, avec une application haut de gamme sur un véhicule de collection.



En mutualisant l'outillage mis en place pour le moteur précédent, le Carnot IFPEN Transports Energie a également développé un moteur basse tension inédit en performances (48 V et 40 kW) destinée à des petits véhicules électriques. Ce moteur intègre un onduleur développé et industrialisé avec Punch Powertrain France, qui se différencie de l'état de l'art par sa densité de performances (20 kVA/kg et 20 kVA/L). Cette motorisation sera commercialisée en 2022.

« Nous avons choisi de développer la technologie de motorisation électrique synchro-réductante pour répondre principalement à deux objectifs, explique Wissam Dib, chef de projet Motorisations électriques et hybrides au sein du Carnot IFPEN Transports Energie :

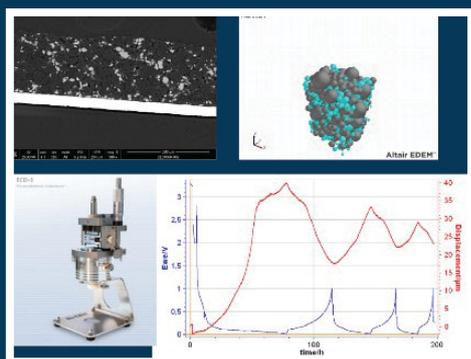
- premièrement, développer un moteur très performant, modulaire et robuste vis-à-vis des conditions d'utilisation extrêmes ;
- ensuite, identifier le compromis performance / coût / fabricabilité le plus attractif pour ce type de marché. La technologie synchro-réductante offre le meilleur compromis coût / performance / rendement : c'est celle que nous avons retenue. Elle nécessite toutefois un pilotage en couple du moteur plus avancé et complexe pour compenser la faible quantité d'aimants : nous avons donc développé des lois de commande adaptées. »

RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE

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



Modèles physiques et techniques avancées pour des batteries de nouvelle génération



Problématique et axes de recherche

L'électrification du parc automobile mondial poursuit sa progression et entraîne une augmentation de la demande en batteries*. Maîtriser cette activité demeure essentiel pour l'industrie automobile européenne, et de nombreuses initiatives sont prises par les institutions pour 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 avancés pour accompagner le développement de nouvelles générations de batteries.

En 2021, les axes de recherche ont porté sur :

- l'évaluation de différentes stratégies de modélisation mécanique des électrodes composites négatives de batteries lithium-ion de génération 3b ;
- la mise en place de nouvelles techniques de caractérisation des aspects mécaniques pour la calibration des modèles associés ;
- l'évaluation de la stéréolithographie comme technique de prototypage rapide.

* Voir aussi le rapport Carnot IFPEN TE 2020 page 14.

LES RÉSULTATS OBTENUS

Modélisation du comportement électrique, thermique et mécanique des batteries

Les futures générations de batteries Gen3b (Li-ion) ou Gen4b (Li-métal tout solide) sont soumises pendant leur fonctionnement à des variations volumiques importantes de leurs électrodes. Ces variations ont un impact sur leurs performances. La dimension mécanique doit donc être prise en compte aujourd'hui dans les modèles électrothermiques globaux. Le Carnot IFPEN TE a évalué différentes possibilités de modélisation mécanique des microstructures d'électrodes Gen3b à composite silicium-graphite, ainsi que les outils logiciels associés. Cette évaluation a permis d'identifier les stratégies les plus adaptées pour prendre en compte cette nouvelle dimension dans les modèles multiphysiques globaux.

De nouvelles méthodes de caractérisation

Intégrer une dimension mécanique dans les modèles nécessite de mettre en place les outils de calibration et de validation associés en complément des méthodes électriques et thermiques classiques. De nouvelles méthodes ont été mises en place à différentes échelles pour évaluer le gonflement des matériaux actifs (imagerie), des électrodes (dilatométrie électrochimique) et des cellules elles-mêmes (méthodes acoustiques).

Prototypage d'électrolytes polymères par impression 3D

La nature solide des futures batteries Gen4 rend possible leur mise en œuvre avec des techniques telles que l'impression 3D. IFPEN a poursuivi l'évaluation de différentes méthodes d'impression et en particulier la FDM (dépôt de filament fondu) et la SLA (stéréolithographie), qui ont donné des résultats prometteurs sur certaines familles d'électrolytes polymères.



Optimisation des performances des moteurs électriques et modélisation prédictive des aimants permanents

Problématique et axes de recherche

La mobilité électrique se diversifie en termes d'architectures de chaînes de traction, de sources d'énergie, de gammes de tension et de puissance.

En outre, deux perspectives d'importance entrent en ligne de compte : d'une part, la montée en tension pour accélérer la recharge et maximiser la densité de performances ; d'autre part, la prise de conscience sur l'usage des terres rares et leur empreinte environnementale.

L'action menée au sein du Carnot IFPEN TE en 2021* a porté sur :

- la recherche de nouvelles architectures de parties actives de moteurs électriques et leur évaluation ;
- l'exploration de la démagnétisation des aimants permanents.

* Voir aussi le rapport Carnot IFPEN TE 2020 p.15

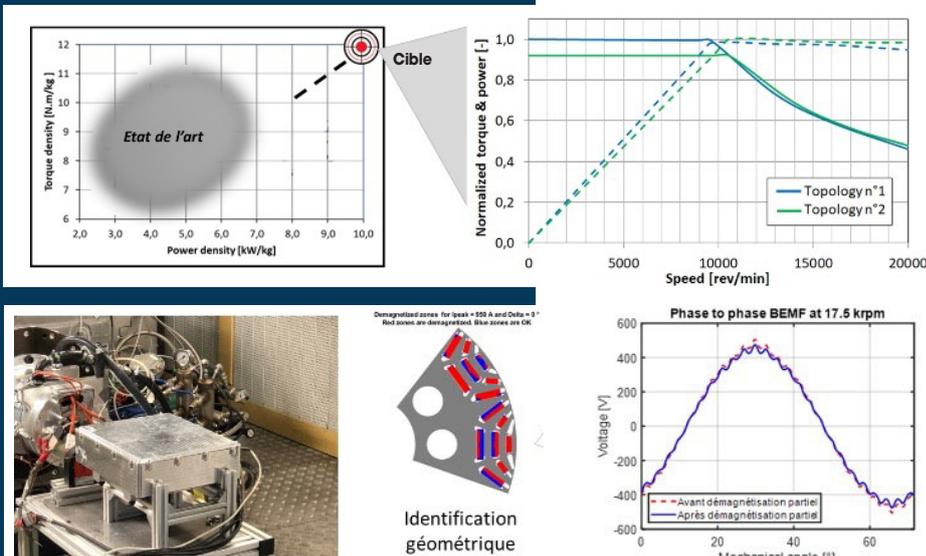
LES RÉSULTATS OBTENUS

Architectures nouvelles pour les parties actives des moteurs électriques

La réduction de la masse des matériaux magnétiques a été investiguée en 2021 par le Carnot IFPEN TE, grâce à une approche de densification des performances gravimétriques des parties actives des machines. Tout d'abord, les méthodes multiphysiques de conception assistée par ordinateur ont été adaptées aux besoins de la problématique et ont permis d'élaborer deux concepts de parties actives minimisant la masse (cuivre, aimant et fer) par unité de puissance. Celles-ci peuvent fonctionner à hautes vitesses, atteignant une densité de puissance de 10kW/kg avec un rendement de 97 %. En outre, elles réduisent la masse des matériaux magnétiques de 35 % vis-à-vis de l'état de l'art à puissance équivalente. Avec ces parties actives, un nouveau système de refroidissement couplant différents types de transferts thermiques a été étudié et implémenté dans une machine à échelle réduite pour la validation des modèles de simulation.

Caractérisation de la démagnétisation des aimants permanents

Les aimants permanents apportent l'efficacité et la densité de performances aux machines électriques. Or, lorsqu'ils sont soumis à une forte température ou un fort champ magnétique, ils perdent leurs caractéristiques magnétiques. Au travers de la bibliographie, de la caractérisation de plusieurs familles d'aimants et de la modélisation fine des aimants, les équipes du Carnot ont mis en place et validé expérimentalement une méthodologie prédictive de la démagnétisation partielle voire totale des aimants permanents au sein d'une machine. Cette méthode est particulièrement utile pour l'étude des aimants sans terres rares, naturellement plus sensibles à ces phénomènes de démagnétisation.





Des algorithmes plus performants pour minimiser l'empreinte environnementale des transports

Problématique et axes de recherche

Les données remontées par les applications de mobilité sont issues des traces GPS des déplacements d'un ensemble d'utilisateurs. La massification de ces données disponibles quotidiennement et leur richesse permettent de développer des algorithmes d'analyse et d'apprentissage des habitudes de mobilité, d'optimisation de la dépense énergétique et de minimisation de l'impact environnemental. Elles nécessitent des traitements lourds de nettoyage, agrégation, enrichissement et analyse de leur représentativité, qui doivent être réguliers pour tenir compte des évolutions récentes et importantes des habitudes de mobilité.

Les axes de recherche du Carnot IFPEN TE portent sur les solutions technologiques d'acquisition et de stockage de données de mobilité GPS, leur traitement et leur accessibilité pour la mise en place d'algorithmes d'analyse et d'apprentissage basés sur du *machine-learning* et du *deep-learning*, ainsi que leur exploitation sous forme de services visant la minimisation de la dépense énergétique et de l'impact environnemental du transport.

LES RÉSULTATS OBTENUS

Enrichissement du *data lake* « mob-data »

Au cours de cette troisième année du projet*, les actions se sont concentrées premièrement sur l'extension du *data lake* « mob-data » regroupant les données de mobilité remontées par les applications mobiles Gecoair™ et Geovelo™ vers la plateforme de services Mobicloud proposée par IFPEN. Ce nouveau *data lake* dans le *cloud* est aujourd'hui directement connecté aux services permettant la génération de ces données. Il inclut également les algorithmes de nettoyage, contextualisation et projection des coordonnées géographiques sur l'infrastructure routière qui ont été développés précédemment et mis à disposition sous forme de services au sein de cette plateforme. Le traitement massif de ces données GPS a été rendu possible par la mise en place de ressources de calcul *cloud* dédiées, disponibles et extensibles à la demande pour l'exécution périodique de ces tâches.

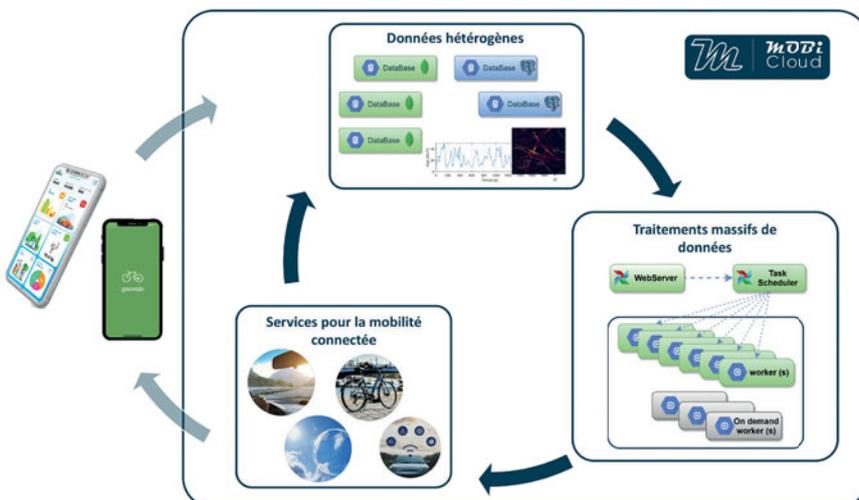
Centralisation des données de mobilité

L'extension du *data lake* « mob-data » a permis d'automatiser à la fois la centralisation des données de mobilité au sein d'un *data lake* IFPEN et leur traitement réalisé quotidiennement. Dans un contexte de changements récents et importants des pratiques de mobilité, l'outil met à disposition des données de mobilité à jour pour la classification des usages, l'analyse des habitudes de mobilité ou la prédiction de la dépense énergétique.

Mise en place de services d'*eco-routing* et d'*eco-charging*

L'exploitation des données de mobilité a également permis la mise en place sur la plateforme Mobicloud de services d'*eco-routing* minimisant la consommation d'énergie ou les émissions polluantes par le choix de l'itinéraire le mieux adapté, et de services d'*eco-charging* proposant l'acheminement optimal sur de longs trajets qui prennent en compte les étapes de recharge d'un véhicule électrique et la quantité d'électricité devant être rechargée à chaque station.

* Voir aussi le rapport Carnot IFPEN TE 2020 p.16





Amélioration du rendement des moteurs thermiques par l'allumage de mélanges dilués à l'air dans des préchambres actives

Problématique et axes de recherche

Dans le cadre de la transition énergétique et du développement des groupes motopropulseurs fortement électrifiés mais recourant encore à des moteurs thermiques, le rendement des motorisations essence doit être amélioré de façon significative. Le Carnot IFPEN TE a déjà démontré que l'utilisation de très forts taux de dilution, par de l'air ou de l'EGR (*Exhaust Gas Recirculation* : gaz d'échappement recirculés), est un axe de développement particulièrement prometteur*.

Cependant, l'allumage de mélanges carburés dans de telles conditions devient complexe et dépasse les capacités des systèmes classiques. Il est donc nécessaire de développer des technologies en rupture. Parmi celles-ci, le Carnot IFPEN TE a privilégié l'allumage par préchambre active.

En 2021, les travaux de recherche se sont donc focalisés sur la mise en œuvre des préchambres actives pour l'allumage des mélanges dilués à l'air. Ce choix a largement démontré sa pertinence avec l'atteinte de taux de dilution supérieurs à Λ 2 tout en gardant de très bonnes conditions d'allumage du mélange. Les émissions d'oxyde d'azote restent cependant élevées en transitoire, complexifiant le système de post-traitement. Aussi, les équipes du Carnot développent aujourd'hui cette technologie pour les mélanges dilués à l'EGR afin de conserver un système de combustion stœchiométrique.

* Voir aussi le rapport Carnot IFPEN TE 2020 p.17



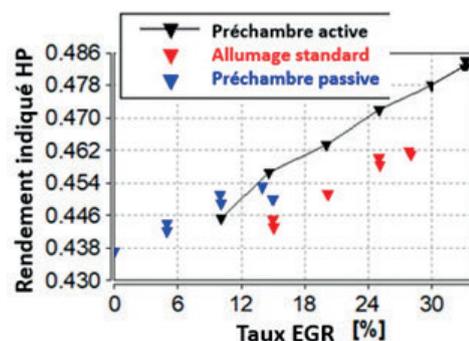
LES RÉSULTATS OBTENUS

Dosage de l'air et du carburant en amont de la préchambre active

La mise en œuvre d'une préchambre active dans un milieu très fortement dilué avec de l'EGR au lieu d'air nécessite de changer complètement de stratégie. En effet, l'air comburant pour la combustion dans la préchambre ne peut plus être amené par l'air en excès dans la chambre principale. Il convient dès lors de l'introduire dans la préchambre en même temps que le carburant, via l'injection d'un mélange déjà carburé à la stœchiométrie. Le Carnot IFPEN TE a donc développé un système de dosage d'air et de carburant en amont de la préchambre, afin d'injecter ce mélange déjà carburé via un injecteur modifié à cet effet. Le mélange injecté dans la préchambre chasse alors les gaz brûlés résiduels provenant de la chambre principale, assurant l'allumage du gaz frais dans la préchambre via la bougie qui y est implantée.

Application à un système de combustion à haut rendement

Cette nouvelle technologie a été appliquée à un système de combustion à haut rendement, permettant d'atteindre de très forts taux de dilution à l'EGR de l'ordre de 35 % tout en conservant des combustions très rapides grâce à l'allumage via la préchambre active. Le rendement indiqué HP obtenu est de 48,5 % sur le point de rendement optimal à 2 500 tr/min, PMI 13,5 bar, soit 3 points de rendement supérieur à la technologie préchambre passive et 2,5 points supérieur à l'allumage standard. Au final, la dilution par l'EGR avec la préchambre prototype développée par le Carnot IFPEN TE permet un gain de rendement de 10 % par rapport au moteur à allumage commandé essence standard sans EGR, tout en permettant de revenir vers des solutions simplifiant le post-traitement et minimisant le coût de la boucle d'air (voir figure ci-dessous).





Motorisations thermiques à hydrogène et biogaz pour la mobilité lourde : des performances accrues sans rejet de polluant

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, d'importantes contraintes subsistent en termes d'encombrement (charge utile), de logistique (temps de charge) et de coût du stockage.

Les carburants neutres en carbone, comme l'hydrogène ou le biogaz, constituent une alternative qui va être amenée à prendre une importance stratégique.

L'utilisation optimale de ce type de carburants dans les moteurs à combustion interne nécessite cependant des développements spécifiques, afin d'en optimiser le rendement et d'en réduire les émissions polluantes. L'évaluation de ce nouveau type de motorisation devient ainsi une nouvelle priorité pour le Carnot IFPEN TE.

La combustion de l'hydrogène dans les moteurs thermiques présente des différences significatives par rapport aux carburants conventionnels à base de carbone. En effet, ses caractéristiques propres sont notamment une large plage d'inflammabilité, une faible résistance au pré-allumage et une faible distance d'extinction à la paroi. Les principaux verrous du système de combustion de l'hydrogène doivent donc être identifiés 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 traités, expérimentalement au banc moteur et numériquement par de la modélisation 3D.

En ce qui concerne les systèmes de combustion au biogaz, le rendement doit en être amélioré dans les applications actuelles pour en optimiser le fonctionnement. Cette amélioration est rendue possible par le développement de systèmes de combustion à allumage commandé dédiés, y compris pour les applications de type poids lourd dont les motorisations (de type Diesel) ne sont pas optimisées pour la combustion par propagation de flamme dans le cas d'une alimentation en gaz.

LES RÉSULTATS OBTENUS

Des stratégies innovantes pour améliorer les performances des moteurs à hydrogène

Un premier assemblage technologique issu d'une base moteur allumage commandé haut rendement a été évalué au banc moteur en combustion hydrogène. Les résultats confirment le très bon compromis rendement/émissions de NOx, à charge partielle : 47 % de rendement indiqué sans émissions de NOx, obtenus grâce à la possibilité de brûler en mélange très pauvre, à des richesses jusqu'à 0,3 (Figure 1). La faible énergie d'allumage du mélange H₂/air et la propension aux combustions anormales qui en découle a également été confirmée. Des solutions ont été identifiées. Les résultats de simulation 3D montrent que l'optimisation du mélange air carburant est d'ordre 1, l'objectif étant d'éviter les zones hétérogènes riches à proximité des parois chaudes d'éléments tels que la bougie et les soupapes d'échappement (Figure 2). Le travail de recherche sur l'aérodynamique interne du moteur en adéquation avec les stratégies d'injection (pression injection, géométrie et inclinaison de l'injecteur) constitue un levier essentiel au développement du moteur à combustion interne à hydrogène et fait partie des investigations qu'il faudra mener dans le futur. La nécessité de l'utilisation d'une technologie de bougie adaptée a été également démontrée.

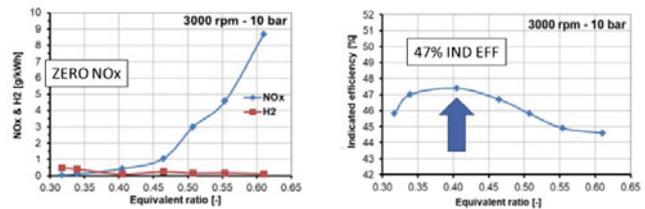


Figure 1 : compromis rendement/NOx

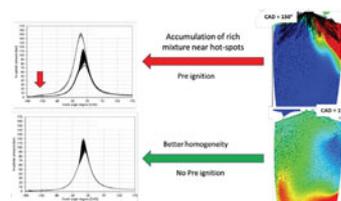


Figure 2 : compréhension de l'origine du préallumage dans un MCI Hydrogène

Des systèmes de combustion optimisés

En ce qui concerne les systèmes de combustion pour applications poids lourd dédiés à l'utilisation de biogaz, les équipes du Carnot ont développé une approche spécifique à très haut rendement basée sur une aérodynamique complexe dans le cylindre, le *Swumble™*. Cette approche a été développée sur une cylindrée unitaire de 2,2 litres, ce qui équivaut à un applicatif moteur de 13 litres en 6 cylindres, cœur de gamme des moteurs poids lourd long routier en Europe. Le système de combustion a été optimisé en réalisant des calculs 3D. Cette simulation a été suivie par la conception et la fabrication d'un monocylindre de recherche, puis par une première phase d'essais de validation du concept et d'optimisation, mettant en avant des gains en rendement d'ores et déjà supérieurs à 10 % tout en restant à richesse 1 pour un fonctionnement totalement dépollué.



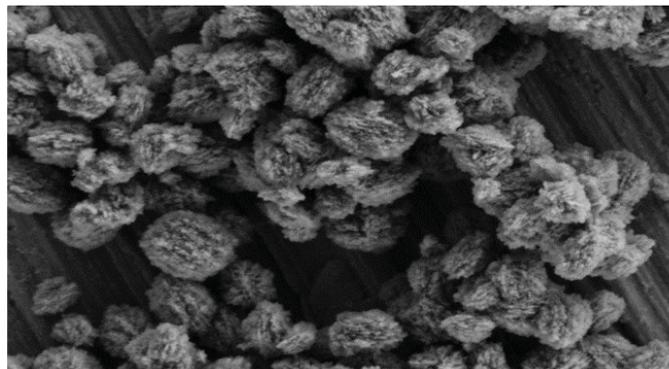
Vers des moteurs à haut rendement sans polluant ni gaz à effet de serre

Problématique et axes de recherche

Pour satisfaire les exigences réglementaires et répondre aux attentes sociétales, les solutions de mobilité intégrant une motorisation thermique doivent à la fois contenir les émissions polluantes à un niveau n'ayant pas d'impact sur la qualité de l'air et réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Il convient dès lors d'orienter la recherche vers des systèmes catalytiques qui soient non seulement actifs dès le démarrage du moteur, mais aussi capables de proposer une haute sélectivité des réactions catalytiques qu'ils promeuvent afin d'éviter, dans le cas de la réduction des oxydes d'azote (NOx), de produire du protoxyde d'azote (N₂O) dont le pouvoir de réchauffement global est très élevé.

Les matériaux envisagés en 2020* pour le stockage de NOx à basse température apparaissent également pertinents pour le traitement direct des NOx par SCR (*Selective Catalytic Reduction*) au moyen du réducteur H₂ pour des motorisations thermiques alimentées au dihydrogène. Par ailleurs, les catalyseurs basés sur des matériaux microporeux fonctionnalisés avec du fer, à la place du cuivre, peuvent améliorer la sélectivité des réactions de SCR à l'ammoniac vers la formation de N₂ au détriment de celle de N₂O.

* Voir aussi le rapport Carnot IFPEN TE 2020 p. 20



LES RÉSULTATS OBTENUS

Évaluation fine des catalyseurs

Les travaux du Carnot IFPEN TE relatifs aux métaux nobles dispersés sur des matériaux aluminosilicates microporeux pour l'adsorption des NOx à basse température ont été étendus à la réduction directe des oxydes d'azote au moyen du réducteur dihydrogène. Les métaux du groupe platine apparaissent en effet efficaces pour promouvoir, de façon synergique avec un support adapté dont une des fonctions est aussi de maintenir le métal bien dispersé, l'adsorption dissociative simultanée de NO et de H₂. Cependant, les catalyseurs H₂-SCR à base de métaux nobles présentent certains inconvénients, parmi lesquels une sélectivité de la réduction des NOx vers N₂ médiocre et un coût élevé. Le travail de recherche a consisté dans un premier temps en une étude bibliographique approfondie des mécanismes gouvernant la réaction désirée. Elle s'est intéressée à une grande variété de supports et de métaux et a permis d'identifier les axes d'investigation à privilégier. Des premières synthèses ont été réalisées à l'échelle du laboratoire, dont l'activité catalytique a été évaluée au moyen d'un banc d'essais à lit fixe traversé par des mélanges de gaz de composition et de concentration contrôlées. Des performances comparables à celles communiquées dans les publications scientifiques ont été atteintes, que ce soit en activité ou en sélectivité. La suite des travaux continuera de privilégier la mise en œuvre de métaux non nobles sur des supports peu coûteux.

Une efficacité accrue grâce aux zéolithes échangées au fer

Le second axe de recherche a conduit le Carnot IFPEN TE, après des travaux en 2020 consacrés aux zéolithes échangées au cuivre, à se focaliser sur des zéolithes cette fois échangées au fer. Celles-ci ciblent d'autres marchés plus demandeurs d'efficacité à haute température, de résistance au soufre, d'efficacité pour des rapports N₂O/NOx élevés ou de limitation des émissions de N₂O. Les méthodes de réalisation ont ainsi été adaptées et notamment en ce qui concerne le mode d'introduction du métal de façon à assurer un fonctionnement optimal. Les performances constatées sont d'un excellent niveau et permettent en outre, en présence de N₂O dans les gaz à traiter, de les réduire efficacement en même temps que le NO.



Mesure des émissions non réglementées pour améliorer la qualité de l'air

Problématique et axes de recherche

Le Carnot IFPEN TE est, depuis de nombreuses années, pleinement impliqué dans des actions visant à l'amélioration de la qualité de l'air. Or, la maîtrise et la réduction des émissions polluantes requièrent aussi la connaissance fine de leur composition physico-chimique et leur quantification. Les normes d'émissions les plus récentes vont dans le sens d'une multiplication des espèces surveillées et d'une diminution des seuils de tolérance. Cette évolution des normes implique de nouveaux développements sur les analyseurs, qu'il s'agisse de la mesure brute (au point d'émission) ou de la mesure diluée (dans l'air que nous respirons).

En 2021, les actions de ressourcement sur la technologie UV de capteur de qualité de l'air ont principalement porté sur :

- l'étude de nouvelles molécules d'intérêt : hydrocarbures aromatiques, molécules soufrées ;
- l'adaptation du système pour passer de la mesure brute (au ppm) à la mesure diluée (au ppb) ;
- la poursuite des travaux sur la mesure de concentration des particules nanométriques dans l'ultraviolet.



LES RÉSULTATS OBTENUS

La mesure de la qualité de l'air a de nombreuses applications.

Mesure des polluants émis par les véhicules : amélioration des outils d'analyse

Les sources mobiles de polluants demeurent une problématique prégnante. Les travaux de ressourcement menés dans ce domaine ont notamment porté sur la mesure d'ammoniac à l'échappement des véhicules particuliers et des moteurs industriels à carburant ammoniac. Par ailleurs, un travail à plus long terme est toujours en cours sur la mesure des particules dans l'UV. L'année 2021 a été l'occasion de caractériser la plupart des particules émises et de mettre en rapport les signaux d'extinction obtenus avec leurs caractéristiques physiques obtenues par microscopie électronique, chromatographie en phase gazeuse et TOF-SIMS. L'analyse détaillée de ces résultats permet de mettre en relation le signal optique avec la nature ou le nombre des particules présentes dans les gaz de combustion.

Mesure des polluants émis par l'industrie : prise en compte de la grande variété des gaz à traiter

La combustion industrielle soulève d'autres questions. En effet, le combustible peut être très variable – en particulier dans les incinérateurs – et les espèces à surveiller sont plus nombreuses. Un travail spécifique a été effectué pour proposer une analyse couplée du dioxyde de soufre (SO_2), de l'ammoniac (NH_3) et du monoxyde d'azote (NO) qui soit précise et simple à intégrer afin d'optimiser les processus de traitement. Les avancées obtenues ont pu être validées sur un site industriel en 2021, ce qui permet d'être confiant quant à leur valorisation avec des acteurs industriels.

Mise en place d'un système de mesure des polluants loin de la source

Une grande part des recherches a été consacrée à la mesure éloignée de la source d'émission ou mesure diluée. Pour réaliser ces mesures, il est nécessaire de disposer d'un système plus précis avec un chemin optique 50 fois plus long que celui utilisé pour la mesure à la source, d'un spectromètre également plus précis et d'algorithmes adaptés. Ce système a pu être testé dans différentes situations : embarqué dans une voiture renifleuse ou dans un sac à dos, il permet de faire un bilan géolocalisé des niveaux de polluants et d'identifier des fuites ou des dysfonctionnements industriels.

PROFESSIONNALISATION ET DÉVELOPPEMENT DE PARTENARIATS SOCIO-ÉCONOMIQUES

Depuis 2020, le Carnot IFPEN Transports Energie a renforcé ses démarches en matière de marketing stratégique et de promotion de l'innovation. Il est notamment engagé auprès des petits acteurs industriels (TPE, PME et ETI) pour les accompagner dans leurs développements R&D ou pour développer en partenariat des produits et des services répondant aux besoins de la mobilité durable.



Machines électriques et électroniques optimisées pour la traction

Le développement de nouvelles briques technologiques dans l'objectif d'améliorer l'efficacité énergétique des motorisations électriques doit s'appuyer sur des phases de validation expérimentale permettant de caractériser de manière fine les performances de nouveaux systèmes. Pour répondre à ce besoin exprimé par les partenaires industriels, le Carnot IFPEN TE a mené des actions visant à définir, implémenter et déployer des méthodologies d'évaluation de la tenue thermique de machines électriques intégrant des systèmes de refroidissement innovants. Il a aussi fait évoluer ses plateformes matérielle et logicielle pour le pilotage de ces systèmes.

Moyens mis en place : modèles numériques, outils de pilotage de machines électriques intégrant des lois de commande

L'évaluation de la thermique machine s'est appuyée sur des modèles prenant en compte l'écoulement d'huile dans une machine électrique, la mise en place de méthodologies pour évaluer les flux thermiques et leur déploiement sur un moyen d'essais dédié. Des systèmes de pilotage ont été prototypés pour exploiter le potentiel de nouveaux composants à base de carbure de silicium (SiC), et un *workflow* pour le développement de lois de commande embarquées a été défini à partir des données de la simulation de machine électrique.

RÉSULTATS

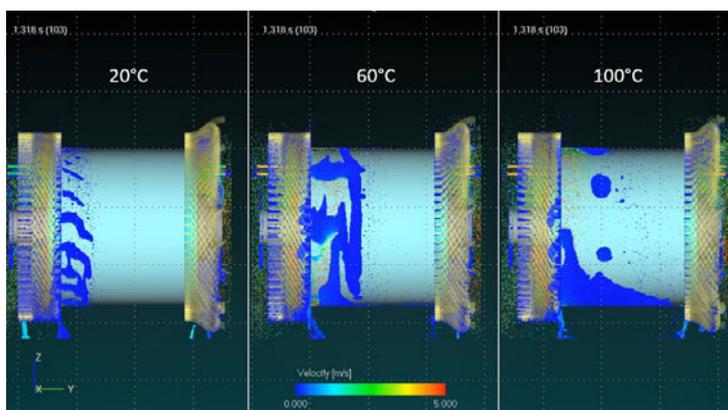
En 2021, Le Carnot IFPEN TE a obtenu deux résultats majeurs qui ont permis de renforcer son positionnement et son attractivité auprès des partenaires industriels.

Définition de systèmes de refroidissement à base de fluides de nouvelle formulation

Des modèles capables de prédire l'écoulement d'huile sur le bobinage et les parties actives d'une machine ont été développés. Ces modèles permettent d'estimer les coefficients d'échange thermique nécessaires à l'évaluation de la distribution de température à l'intérieur d'une machine électrique. Plusieurs prototypes ont été réalisés pour valider expérimentalement l'apport de différentes architectures et de fluides avec des propriétés adaptées au refroidissement direct des parties actives.

Mise à disposition de systèmes de pilotage des machines électriques de nouvelle génération

Des convertisseurs haute tension à base de modules de puissance SiC pouvant fonctionner au-delà de 40 kHz ont été prototypés pour répondre aux fortes contraintes de pilotage des machines électriques de nouvelle génération. Ces systèmes électroniques et une plateforme de contrôle adaptée ont permis de caractériser finement les performances atteintes par ces nouvelles machines pour la traction électrique / hybride. Un *workflow* de calibration de lois de commande avancées a été perfectionné et déployé sur ces systèmes électroniques, permettant un pilotage précis et robuste dans les zones limites de fonctionnement de ces machines. La mise en œuvre de ce *workflow* dans des actions de recherche partenariale permettra aux industriels de caractériser de façon très précise différents types de machines électriques.



Modélisation de l'écoulement d'huile dans une machine électrique : analyse de l'impact de la température du fluide.



Intégration des piles à combustible dans les systèmes propulsifs électriques hybrides

Afin d'apporter des réponses pertinentes aux acteurs socio-économiques du domaine de la pile à combustible (PàC) appliquée aux moyens de transport fonctionnant à l'hydrogène, le Carnot IFPEN TE a porté ses efforts durant l'année 2021 sur :

- l'amélioration des capacités de simulation système,
- la mise en place d'algorithmes de contrôle-commande de PàC,
- le développement de méthodologies d'essais adaptées aux véhicules à hydrogène.

Moyens mis en place : adaptation de la plateforme Simcenter Amesim et génération de données sur un banc d'essais

Les activités de simulation sont réalisées avec la plateforme Simcenter Amesim. Celle-ci a été adaptée pour la gestion d'un système à deux sources d'énergie électrique (batterie et pile à combustible). Les algorithmes de contrôle du système pile sont développés au moyen d'une co-simulation entre Amesim pour le système et l'outil Simulink pour les algorithmes de contrôle-commande.

La génération de données expérimentales est nécessaire au bon paramétrage des simulateurs numériques. Ainsi, des données ont été obtenues au banc à rouleaux sur un véhicule à hydrogène. En parallèle, un premier banc d'essais de système pile à combustible a été mis en place à IFPEN.

RÉSULTATS

Mise en place d'une plateforme de simulation de systèmes propulsifs électriques hybrides

Les travaux réalisés en 2021 ont permis la mise à disposition au sein du Carnot IFPEN TE de plateformes de simulation véhicules performantes et prédictives. Ces dernières permettent de réaliser des études de dimensionnement de systèmes propulsifs électriques hybrides (batterie et PàC). Il est désormais possible de proposer des cahiers des charges optimisés pour les principaux composants du système, tout en tenant compte des spécificités de l'application (camion, bus, autocar par exemple) et de ses usages (profils de mission).

Développement d'algorithmes de contrôle-commande d'un système PàC

De plus, un premier jeu d'algorithmes de contrôle-commande d'un système PàC a été mis en place et testé en co-simulation. Ces travaux vont permettre, dans le cadre d'un prochain projet industriel, de développer des algorithmes visant non seulement à contrôler un système à double source d'énergie électrique (batterie et PàC), mais aussi à intégrer des contraintes permettant de limiter autant que possible le vieillissement du couple batterie / PàC.





Essais de moteurs électriques pour une traction haute tension et forte puissance

L'objectif de cette action* a été de réaliser une campagne d'essais exhaustifs pour valider les performances et la durabilité de machines électriques et d'onduleurs associés. Grâce à cette campagne, le Carnot IFPEN TE dispose d'une référence industrielle incontournable pour une chaîne de traction haute tension et forte puissance d'un véhicule électrique. Cette référence renforce la crédibilité du Carnot IFPEN TE face aux acteurs socio-économiques.

Moyens mis en place : plateforme d'essais, systèmes de pilotage, modèles numériques

En 2021, les équipes du Carnot IFPEN TE ont concentré leurs efforts sur :

- la finalisation de la mise en place d'une plateforme d'essais d'endurance de systèmes électriques, plateforme qui a permis de valider l'endurance de plusieurs prototypes industriels ;
- l'amélioration du workflow de développement et de validation de lois de commandes innovantes pour le pilotage des moteurs synchro-réductants développés par les équipes du Carnot ;
- la consolidation et le recalage des modèles de simulation de machines électriques grâce à des comparaisons précises avec les données expérimentales.

RÉSULTATS

Les expérimentations réalisées en 2021 ont permis de valider :

- l'endurance du moteur conçu par le Carnot IFPEN TE et de son onduleur intégré ;
- les performances magnétiques et thermiques du moteur obtenues préalablement par simulation avec son onduleur intégré ;
- l'endurance sur la tôle rotor représentative d'une application industrielle ;
- les lois de commande des moteurs dans un onduleur industriel.

À la suite de ces validations expérimentales, des variations paramétriques des lois de commande sur banc d'essais ont conduit à l'obtention d'un système à l'efficacité optimale.

* Voir aussi le rapport Carnot IFPEN TE 2020 p.20

Procédure des essais d'endurance

Exigences

Spécification des essais basée sur les normes de l'automobile

Ordre des essais à respecter

Nombre de prototypes à tester

Essais de caractérisation réalisés avant et après l'essai d'endurance

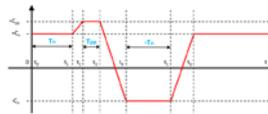
Mise au banc et préparation des essais

Un banc en Back-to-back utilisé

Validation des mesures électriques

Validation mécanique (montage moteur, vibrations, performances haute vitesse)

Conditionnement de l'essai et mise en place de la procédure de test automatique

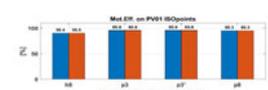


Résultats des essais

Performances des moteurs après 55 jours de test d'endurance sans arrêt

Analyse de dispersion et impact de la durabilité sur les performances du moteur

Performance du système de refroidissement





Outils digitaux pour favoriser la mobilité douce et guider les utilisateurs en temps réel

Le calcul d'itinéraire et le guidage pour des déplacements en mobilité douce (vélos, vélos à assistance électrique...) se basent actuellement essentiellement sur des informations statiques. L'objectif de cette action inter-Carnot, impliquant le Carnot IFPEN TE et le Carnot Clim'adapt du Cerema, est d'enrichir le guidage vélo avec des informations dynamiques provenant soit des autres usagers, soit des informations de sécurité temps-réel des villes, et d'évaluer des solutions de déclenchement de signalisation telles que les systèmes dits C-ITS (*Connected intelligent transportation system*).

Moyens mis en place : des algorithmes pour le calcul d'itinéraires et l'aide à la décision

En 2021, la première étape a consisté à calculer des nouveaux attributs « communautaires » pour l'ensemble des tronçons de rues pouvant enrichir le calcul d'itinéraires vélo. Ces nouveaux attributs sont obtenus à partir de l'agrégation par arc routier des traces des déplacements des utilisateurs enregistrés par l'application mobile servant de guidage. À la suite de cette première étape, les travaux de recherche se sont orientés sur l'exploitation de ces nouveaux attributs pour l'amélioration du calcul d'itinéraire, ainsi que pour les outils d'aide à la décision de suivi de l'usage du vélo sur un territoire. Un effort particulier a porté, en collaboration avec le Carnot Clim'adapt, sur l'identification d'une intersection non adaptée pour les cyclistes (occurrence et temps d'attente important ainsi que la présence de comportements incidentogènes) afin d'évaluer par la suite via la simulation l'apport des C-ITS. Le Carnot Clim'adapt apporte l'ingénierie d'expertise dans le domaine des C-ITS et dans l'approche des territoires.

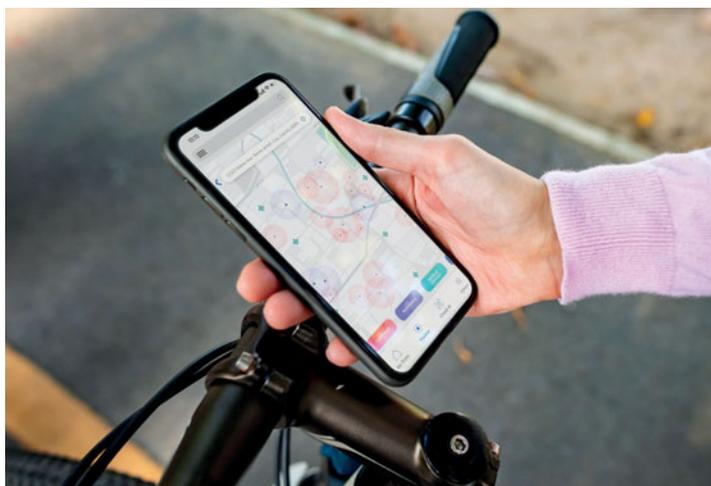
RÉSULTATS

Utilisation d'un modèle physique pour simuler le comportement d'un cycliste

Les données de mobilité brutes recueillies par l'application mobile (trace utilisateur GPS) ont été traitées et enrichies à l'aide d'un modèle physique du vélo permettant de calculer des comportements incidentogènes ainsi que les phases d'arrêt du cycliste. Ceci a été réalisé sur l'ensemble des trajets effectués et projeté sur l'infrastructure routière afin de placer les données dans un référentiel routier et non utilisateur. Une agrégation à l'échelle du tronçon de route a permis de fournir des cartographies de fréquentation des rues, ainsi que leur taux d'incidence de comportements à risque. Ces données ont été analysées en les confrontant à des données d'accidents avérés. Pour chaque arc routier du graphe mathématique, on dispose désormais de la distance, de la durée médiane des cyclistes parcourant cet arc, de la fréquence des arrêts et du temps d'arrêt médian.

Mise en place d'outils permettant aux aménageurs d'améliorer l'infrastructure routière et de mesurer l'impact de solutions C-ITS

Les nouveaux attributs disponibles permettent aux aménageurs d'identifier les pistes d'amélioration de l'infrastructure routière et de réaliser un calcul d'itinéraire basé sur le temps de parcours réel d'une rue et les retours des données utilisateurs. Une première exploitation de ces données a consisté à analyser la capacité à intégrer ces éléments dans le calcul d'itinéraire. Dans ce but, il a été nécessaire de recourir à un modèle permettant d'obtenir ces valeurs à partir de la description de la rue (distance, type de voie, type d'intersection) pour obtenir ces informations sur l'ensemble du réseau. Enfin, une mise en situation d'exploitation de ces données a été réalisée, afin d'identifier dans Bordeaux une intersection « bloquante » et dangereuse pour les cyclistes et d'évaluer l'apport de la mise en place d'une solution C-ITS en simulation.





Optimisation de l'ergonomie de la plateforme xDash

xDash est une plateforme *software-as-a-service* qui offre aux ingénieurs métier la possibilité d'agréger de façon intuitive et indépendante les services web, les algorithmes et les données de mobilité, ainsi que de construire facilement et de façon autonome des tableaux de bord d'analyse, de paramétrage, de simulation et de supervision. Les équipes du Carnot IFPEN TE ont développé la plateforme de manière à la rendre accessible au public sur un site web qui lui est dédié : <https://xdash.io>.

Moyens mis en place : des outils intuitifs pour tous les utilisateurs

Les travaux menés durant l'année 2021* se sont concentrés sur l'optimisation de l'ergonomie logicielle, au travers d'une démarche d'*UX Strategy*, impliquant les utilisateurs d'IFPEN. Cette démarche visait à faire de xDash un outil intuitif, d'emploi facile et riche en fonctionnalités pour les futurs clients du monde socio-économique. La seconde modification majeure consistait à rendre xDash utilisable en Python, en JavaScript ou avec les deux langages, ouvrant son utilisation au monde de la science des données en général.

RÉSULTATS

Les améliorations visées ont été testées et validées sur un panel diversifié, constitué d'utilisateurs novices ou aguerris.

Amélioration de la plateforme

De nouvelles fonctionnalités ont été développées :

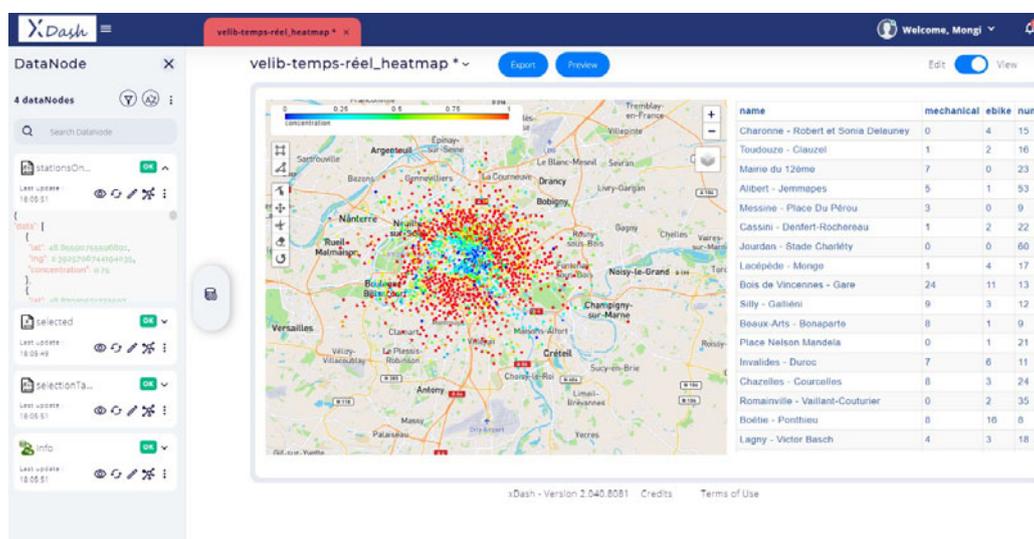
- création d'un espace dédié à l'apprentissage, proposé dès l'ouverture (tour guidé, projet d'entraînement, galerie de démos) ;
- ajout de fonctions d'édition « classiques » pour les widgets : copier/coller, couper, sélection, alignement, redimensionnement, permettant une différenciation par rapport aux outils similaires purement orientés « code » ;
- ajout de fonctions évoluées pour les projets : renommage, duplication, création de groupes, partage ;
- simplification de la création d'images Docker pour l'exécution du code en Python ;
- généralisation des fonctions de recherche : projets, data, widgets, graphe ;
- évolution du graphe de dépendance : interactivité, intégration avec l'éditeur, édition à partir du graphe, filtrage par types ;
- intégration de la documentation au sein de l'éditeur avec accès direct ;
- intégration d'un outil de gestion des demandes utilisateur : aide, remontée de problème, suggestion.

Application de la plateforme xDash à des analyses économiques

Cette version a été appliquée avec succès pour le développement de différents outils métier comme :

- l'analyse de l'empreinte CO₂ sur un territoire en fonction des politiques d'orientation des mobilités et des statistiques disponibles ;
- l'étude ACV (analyse de cycle de vie) des véhicules électriques.

* Voir aussi le rapport Carnot IFPEN TE 2020 p.24





Solutions numériques pour évaluer les émissions polluantes des véhicules en conditions réelles de conduite

La sensibilité des émissions polluantes aux conditions réelles d'utilisation est forte. Le Carnot IFPEN TE développe des outils pour connaître de manière précise et représentative l'usage réel des véhicules et son impact sur les émissions. Ces nouvelles connaissances sont exploitées pour identifier les causes de surémission, développer des actions de réduction des émissions sur un territoire donné, ainsi que pour préconiser des méthodes efficaces de surveillance des émissions du parc.

Moyens mis en place : de la mesure à la modélisation des émissions

La méthodologie déployée associe la mesure embarquée des émissions en conditions réelles, la modélisation microscopique des émissions et le développement d'outils de collecte et d'analyse de données d'usage réel à grande échelle. Dans la continuité des actions menées en 2020*, les équipes du Carnot IFPEN TE ont focalisé leurs actions 2021 sur l'enrichissement de ces briques technologiques.

RÉSULTATS

Le développement en collaboration avec la PME Capelec de l'analyseur connecté Real-e™ se poursuit et a donné lieu à plusieurs avancées :

Extension du système de surveillance des émissions à la mesure des particules ultrafines

Les travaux 2021 ont permis l'intégration d'un système de mesure des particules ultrafines. Pour parvenir à ce résultat, un instrument de laboratoire a été adapté à la mesure embarquée à grande échelle.

Réalisation d'études comparatives pour évaluer l'apport de la mesure embarquée par rapport à la mesure statique

Des expérimentations sur un échantillon varié du parc automobile réel ont été menées pour étudier l'apport de la mesure embarquée en comparaison avec la mesure statique. Ces travaux permettent d'alimenter les réflexions sur les systèmes de surveillance du parc, qui jouent un rôle central dans un contexte où les 5 % des véhicules les plus polluants émettent plus de la moitié des émissions totales du parc pour certaines espèces de polluants. De premières expérimentations terrain ont également été réalisées sur un site extérieur à IFPEN.

Lors de prochains travaux, ces outils et méthodes seront ajustés pour pouvoir traiter d'autres secteurs du transport comme les deux-roues et les poids lourds.

Extension des outils à la surveillance de l'efficacité énergétique des véhicules électrifiés

La consommation énergétique en usage réel des véhicules fortement électrifiés est également particulièrement sensible aux conditions d'usage. L'approche déployée pour l'étude des émissions polluantes de véhicules thermiques a donc été étendue pour l'étude de cette problématique. Les premiers travaux menés ont permis l'enrichissement des outils de modélisation pour la prise en compte plus fine de l'impact des conditions climatiques.

* Voir aussi le rapport Carnot IFPEN TE 2020 p.23



ZOOM SUR : LA FIN DE LA FILIÈRE CARNAUTO

L'action filière CARNAUTO, dédiée depuis 2015 au secteur de l'automobile et de la mobilité, est arrivée au terme de sa mission. Le Carnot IFPEN Transports Energie en a été le pilote, œuvrant ainsi à développer la capacité de ses partenaires à répondre au mieux aux besoins de R&I des ETI, PME et TPE du secteur. Bilan.



L'action filière CARNAUTO : quels atouts pour quelle mission ?

C'est dans le cadre de l'appel à projet PIA3, « Valorisation instituts Carnot en réponse aux besoins des filières », que CARNAUTO a été mis en place en 2015 et coordonné par le Carnot IFPEN TE. Grâce aux moyens alloués par l'ANR, CARNAUTO a mené avec efficacité sa mission au service des TPE/ PME et ETI du secteur automobile et de la mobilité.

En quoi consistait cette mission ?

A renforcer la compétitivité et l'attractivité des entreprises du secteur de l'automobile et de la mobilité en facilitant leur accès à l'innovation. Pour cela, neuf acteurs majeurs de la recherche publique (les Carnot ARTS, CEA LETI, CEA LIST, Cetim, Energies du futur, ESP, IFPEN Transports Energie, Ingénierie@Lyon, Télécom & Société numérique) ont travaillé en collaboration avec la Plateforme automobile (PFA) et quatre pôles de compétitivité (NextMove, CARA, PVF et ID4CAR).



Mieux collaborer avec les PME et ETI

CARNAUTO a permis de connaître plus précisément les petites et moyennes entreprises dans certaines grandes régions, de mieux comprendre leurs problématiques et leurs besoins de R&I et donc la manière de les aborder et de leur proposer une offre adaptée.

Grâce à CARNAUTO, le Carnot IFPEN TE a pu accélérer sa mutation et sa montée en compétences, afin d'anticiper au mieux les marchés futurs et mettre ses moyens d'essais en phase avec les besoins de R&I des industriels et les sujets émergents. D'autres investissements

ont pu être réalisés dans des bancs pour moteurs électriques, une plateforme de prototypage de batteries et des moyens d'essais pour la mobilité hydrogène. Ces installations, nouveaux moyens ou évolution de moyens existants, sont localisées dans les locaux du Carnot IFPEN TE sur les sites de Rueil-Malmaison et de Lyon. Elles permettent de répondre efficacement aux demandes des industriels sur ces nouveaux sujets.

L'action de CARNAUTO a contribué à la consolidation du réseau Carnot grâce au développement d'offres communes, à la tenue d'événements, au partage d'expériences et de bonnes pratiques.

La filière AirCar, dont le Carnot IFPEN TE est partenaire, a également pris fin. L'avenir pourrait voir émerger une alliance Carnot mobilité. A suivre !



OUVERTURE INTERNATIONALE

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 du programme Horizon 2020. Elles contribuent ainsi au développement de la R&I européenne pour une mobilité durable.

Électrification des véhicules

Phoenix : vers un véhicule hybride rechargeable zéro émission



Coordonné par le Carnot IFPEN TE et mené avec sept acteurs industriels et académiques, le projet Phoenix (*PHEV towards zero Emissions & ultimate ICE efficiency*), démarré en 2021, a pour objectif de développer un démonstrateur de véhicule électrique hybride rechargeable avec un niveau de consommation de carburant et d'émissions de polluants réduit. Le Carnot IFPEN TE interviendra principalement sur la conception du système de combustion basé sur le concept Swumble™, la conception du système de post-traitement, la réalisation des moteurs prototypes et la calibration énergétique du moteur multicylindre.



Ce projet a bénéficié d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne H2020 au titre de la convention de subvention 101006841.

Modalis² : modéliser les futures générations de batteries



Porté par le Carnot IFPEN TE et neuf partenaires, Modalis² a pour objectif de développer une chaîne d'outils numériques permettant de modéliser et de concevoir des systèmes de batteries mettant en oeuvre de nouveaux matériaux tels que les alliages avec du silicium pour les électrodes négatives et des électrolytes solides. Modalis² accompagnera le développement des nouvelles générations de cellules de batterie en se basant sur la modélisation et la simulation.



Ce projet a bénéficié d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne H2020 au titre de la convention de subvention 875193.

ReFreeDrive : des moteurs électriques sans terres rares et des onduleurs intégrés



L'utilisation de terres rares pour les aimants constitue un frein majeur au développement des motorisations électriques. Le projet ReFreeDrive vise ainsi la mise au point d'un concept de machine électrique capable de fonctionner sans terres rares ainsi que d'une nouvelle génération d'onduleurs intégrés aux moteurs. Au sein de ce projet, les équipes du Carnot IFPEN TE sont en charge du design de la machine électrique, de l'onduleur et de la stratégie de contrôle.



Ce projet a bénéficié d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne H2020 au titre de la convention de subvention 770143.

Développement de services et d'applications pour le véhicule connecté

Cevolver : simplifier l'accès des véhicules électriques aux particuliers



Le projet Cevolver (*Connected Electric Vehicle Optimized for Life, Value, Efficiency and Range*) veut simplifier l'usage des véhicules électriques aux particuliers. Piloté par FEV et mené avec neuf partenaires européens, il a notamment pour objectif d'augmenter l'efficacité énergétique de ces véhicules via la mise au point d'algorithmes et le développement des services web. Les équipes du Carnot IFPEN TE apportent leur expertise en contrôle et en développement d'algorithmes.



Ce projet a bénéficié d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne H2020 au titre de la convention de subvention 824295.

LongRun : amélioration de la chaîne de traction de poids lourds grand routier



Le projet LongRun (*Development of efficient and environmental friendly LONG distance powertrain for heavy duty trucks and coaches*) a été lancé en janvier 2020 dans le but de développer un ensemble complet de chaînes de traction pour poids lourds et autocars plus respectueux de l'environnement. 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.



Ce projet a bénéficié d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne H2020 au titre de la convention de subvention 874972.



Amélioration des motorisations thermiques

LowCarbfuels.dk : des carburants durables pour le transport aérien et maritime



Soutenu par un fonds de recherche et innovation danois et associant plus d'une dizaine de centres de recherche et d'universités européennes, ce projet 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.

OLGA et MAGPIE : deux projets d'envergure pour des ports et des aéroports plus verts



Sélectionnés dans le cadre de l'appel à projets collaboratifs Green Deal (Programme Horizon 2020), les projets OLGA (*hOListic Green Airport*) et MAGPIE (*sMArt Green Ports as Integrated Efficient multimodal hubs*) ont démarré fin 2021.

Dans le cadre du consortium MAGPIE, le port de Rotterdam, DeltaPor, HAROPA et Sines collaborent avec des instituts de recherche et plus de 30 entreprises dans l'objectif d'expérimenter des logistiques portuaires plus intelligentes et durables. Une dizaine de projets pilotes visent à tester d'une part l'utilisation de nouveaux carburants et de nouveaux vecteurs énergétiques tout au long de la chaîne de valeur et d'autre part la digitalisation, l'automatisation et l'autonomisation des transports portuaires.

Les partenaires d'OLGA - des aéroports, des compagnies aériennes, manutentionnaires, instituts de recherche et PME - visent à réduire les émissions côté pistes et côté ville, améliorer l'efficacité énergétiques des terminaux, favoriser la construction verte, ou encore l'usage de nouveaux carburants. La préservation de la biodiversité, la qualité de l'air, la réduction du bruit ou encore du gaspillage sont également au cœur des projets d'innovation.

Les équipes du Carnot IFPEN TE vont concourir à la réalisation des projets en élaborant, entre autres, des tableaux de bord interactifs permettant de créer et de visualiser les inventaires d'émissions des villes portuaires. Pour ce faire, elles vont mettre à profit leur expertise dans la modélisation microscopique des émissions polluantes.



Le projet OLGA a bénéficié d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne H2020 au titre de la convention de subvention 101036871.

Le projet MAGPIE a bénéficié d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne H2020 au titre de la convention de subvention 101036594.



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 (EARPA, ERTRAC, EGVA). En 2020, il a rejoint Polis, réseau de villes européennes, qui soutient le déploiement de technologies et politiques innovantes et durables dans le domaine du transport local.

En 2021, il a rejoint 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 a activement contribué à la préparation du nouveau programme-cadre européen Horizon Europe.

SALONS ET MANIFESTATIONS 2021

En 2021, le contexte sanitaire n'a pas réduit la mobilisation des chercheurs du Carnot IFPEN Transports Energie. La transition numérique engagée depuis plusieurs années a contribué à assurer leur flexibilité et leur adaptabilité. Ainsi, le Carnot IFPEN Transports Energie a pu intervenir lors d'événements aux formats adaptés.

30 mars

Webinaire Carnauto « Choix technologiques pour motorisations électriques »



9-10 juin

Congrès international SIA Powertrain & Power Electronics



24 juin

RDV IFPEN sur le thème de l'hydrogène



11-15 octobre

Congrès mondial Intelligent Transport System & Services (ITS)



17-18 novembre

Rendez-vous Carnot



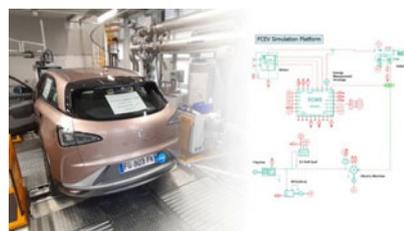
1^{er} juin

Salon Automotive Techdays



16 juin

Webinaire sur la conception du système propulsif des voitures à hydrogène et sur le rôle de la simulation



28 septembre

Cap'Carnot



8-10 novembre

FORM Forum de l'EARPA



SÉLECTION DE PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Électrification des véhicules

• Technologies des voitures électriques : motorisations, batteries, hydrogène, recharge et interactions réseau

Juton A. (ENS Saclay - France), Rain X. (IUT Cachan France), Sauvant-Moynot V. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Orsini F. (Renault - France), Saber C. (Safran - France), Bacha S. (Univ. Grenoble Alpes - France), Bethoux O. (Sorbonne Université - France), Labouré E. (IUT de Cachan - France)
Dunod, ISBN 9782100818068, e-ISBN 9782100830367, 424 pages

Machines électriques

• Investigation of stator slots and rotor flux barriers number impact on the performances of a six-phase synchronous reluctance motor assisted by permanent magnets

Abdelli A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Cisse K.M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Chareyron B. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Nasr A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Gilson A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
ICEMS International conference on electrical machines and systems, Gyeongju, Corée, 31 octobre-3 novembre 2021

• Investigation of the modulation tuning advantages for voltage source inverters with adjustable DC bus voltage

Sabrie A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Battiston A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Gauthier Jean-Yves (INSA Lyon - France), Lin Shi X. (INSA Lyon - France)
EPE ECCE Europe, 23rd, Ghent, Belgium, 6-10 septembre 2021

• High-power / high-voltage (250 kW / 750V) SiC-based inverter for electric vehicles applications

Battiston A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Kefsi L. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Milosavljevic M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Sabrie A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
EPE ECCE Europe, 23rd, Ghent, Belgium, 6-10 septembre 2021

• Ferrite assisted synchronous reluctance motor: simulation methods and experimental validation

Chareyron B. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Gilson A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Abdelli A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Cisse K.M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Nasr A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
IEMDC International electric machines & drives conference, 17-20 mai 2021, conférence en ligne

ORC

• Workflow design methodology for ORC systems dedicated to waste heat recovery from the engine coolant of commercial vehicles

Smague P. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Loszka M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Sery J. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
ORC International seminar on ORC power systems, 6th, Munich, Allemagne, 11-13 octobre 2021

Batteries

• A Demobase project: HIL tests approach for integration assessment of an innovative battery pack in a light electric vehicle

Dabadie J.-C. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Voise L. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Bernard J. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Petit M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Martin J. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
SIA Powertrain & power electronics, 9-10 juin 2021, conférence en ligne

• Thermal runaway modeling for Li-ion batteries: chemistry, design, and ageing impact on safety issue

Abada S. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Petit M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Bernard J. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Batteries event, 23rd, Lyon, France, 29 septembre-1 octobre 2021

• Data-driven model development to predict the aging of a Li-ion battery pack in electric vehicles representative conditions

Mingant R. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Petit M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Belaid S. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Bernard J. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Journal of Energy Storage, Vol. 39, July 2021, Article No 102592, 11 p., doi 10.1016/j.est.2021.102592

Pile à combustible

• Fuel cell behavior and energy balance on board a Hyundai Nexa

Sery J. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Leduc P. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
SIA Powertrain & power electronics, 9-10 juin 2021, conférence en ligne

Développement de services et d'applications pour le véhicule connecté

• Pre-calibration of a discrete choice model and evaluation of cycling mobility for Île-de-France

Feng G. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Jean M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Chasse A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Horl S. (SystemX - France)
Procedia Computer Science, Vol. 184, 2021, pp. 172-177, doi 10.1016/j.procs.2021.04.003

Gestion énergétique

• A novel real driving emissions mapping model at a road-segment scale

Laraki M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), De Nunzio G. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Thibault L. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Degeilh P. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Rodriguez Rodriguez S. S. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Ribstein B. (Aria Tech - France), Mahe F. (Aria Tech - France), Rocher B. (Atmo Sud - France), Piga D. (Atmo Sud - France)
TAP Transport and air pollution conference, 24th, 30 mars-1 avril 2021, conférence en ligne

• Real-time eco-driving for connected electric vehicles

NGO C. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Solano A. E. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Aguado Rojas M. M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Sciarretta A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Chen B. (RWTH - Allemagne), El Baghdadi M. (Vrije Univ. - Belgique)
IFAC Papers Online, Vol. 54, No 10, 2021, pp. 126-131, doi 10.1016/j.ifacol.2021.10.152

• A general constrained optimization framework for the eco-routing problem: comparison and analysis of solution strategies for hybrid electric vehicles

De Nunzio G. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Ben Gharbia I. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Sciarretta A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Transportation Research Part C - Emerging Technologies, Vol. 123, février 2021, Article No 102935, 21 p., doi 10.1016/j.trc.2020.102935

• Conventional engine vehicles model parametrization for real-world fuel consumption estimation

Michel P. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Rodriguez Rodriguez S. S. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Chasse A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Fontaras G. (Joint Res. Cent. European Commission - Belgique), Pavlovic J. (Joint Res. Cent. European Commission - Belgique), Ktistakis M. A. (Joint Res. Cent. European Commission - Belgique), Komnos D. (Joint Res. Cent. European Commission - Belgique)
TAP Transport and air pollution conference, 24th, 30 mars-1 avril 2021, conférence en ligne

Qualité de l'air

- **Road traffic dynamic pollutant emissions estimation: from macroscopic road information to microscopic environmental impact**
De Nunzio G. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Laraki M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Thibault L. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Atmosphere, Vol. 12, No 1, 2021, Article No 53, 24 p., doi 10.3390/atmos12010053

Amélioration des motorisations thermiques

Modélisation et simulation de la combustion

- **Numerical investigations on hydrogen-enhanced combustion in ultra-lean gasoline spark-ignition engines**
Iafrate N. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Matrat M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Zaccardi J.-M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
International Journal of Engine Research, Vol. 22, No 2, 2021, pp. 375-389, doi 10.1177/1468087419870688
- **A strategy to couple thickened flame model and adaptive mesh refinement for the LES of turbulent premixed combustion**
Mehl C. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Liu S. (Convergent Science - État-Unis), Colin Olivier (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Flow Turbulence and Combustion, Vol. 107, No 4, 2021, pp. 1003-1034, doi 10.1007/s10494-021-00261-2
- **Development and application of bivariate 2D-EMD for the analysis of instantaneous flow structures and cycle-to-cycle variations of In-cylinder flow**
Sadeghi M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Truffin K. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Peterson B. (Univ Edinburgh - Royaume-Uni), Bohm B. (Technische Univ Darmstadt - Allemagne), Jay S. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Flow Turbulence and Combustion, Vol. 106, janvier 2021, pp. 231-259, doi 10.1007/s10494-020-00197-z
- **Experimental and OD numerical investigation of ultra-lean combustion concept to improve the efficiency of SI engine**
De Bellis V. (Univ Napoli Federico II - Italie), Malfi E. (Univ Napoli Federico II - Italie), Bozza F. (Univ Napoli Federico II - Italie), Kumar D. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Serrano D. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Dulbecco A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Zaccardi J.-M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
WCX SAE World congress experience, 13-15 avril 2021, SAE 2021-01-0384, doi 10.4271/2021-01-0384

Technologies moteurs

- **Modelling of exhaust emissions from a PHEV hybrid vehicle**
Nicolas F. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Loszka M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Cheimariotis I. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Zinola S. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Font G. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Loussaief S. (Siemens - France), Groisil M. (Siemens - France)
Aachen colloquium sustainable mobility, 30th, Aix-la-Chapelle, Allemagne, 4-6 octobre 2021
- **Swumble 3-cylinder high efficiency gasoline engine for future electrified powertrains**
Leroy T. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Nowak L. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Gautrot X. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Martinez Alvarado L. E. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
SIA Powertrain & power electronics, 9-10 juin 2021, conférence en ligne

- **New combustion process for higher efficiency of gasoline engines**
Leroy T. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Nowak L. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Odillard L. (Valeo - France), Francois D. (Garrett - France)
MTZ Worldwide, Vol. 82, décembre 2021, pp. 16-25, doi 10.1007/s38313-021-0717-0

Utilisation de carburants bas carbone

- **Experimental and numerical investigation on hydrogen internal combustion engine.**
Rouleau L. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Duffour F. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Walter B. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Kumar R. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Nowak L. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
ICE International conference on engines and vehicles, 15th, Capri, Italie, 12-16 septembre 2021, SAE 2021-24-0060
- **Potential and challenges of the hydrogen internal combustion engine from experimental and numerical investigation**
Duffour F. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Walter B. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Ternel C. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Maisonnier G. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Rouleau L. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Kumar R. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Maio G. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Gatellier B. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
SIA Powertrain & power electronics, 9-10 juin 2021, conférence en ligne
- **Ethanol fuel content impact on regulated and non-regulated emissions on EU6c and EU6d-Temp vehicles**
Anselmi P. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Fortune J. F. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Cologon P. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Hayraut P. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Heninger M. (Alyxan - France), Leprovost J. (Alyxan - France), Lemaire J. (Alyxan - France)
SIA Powertrain & power electronics, 9-10 juin 2021, conférence en ligne
- **Advances in combustion control for natural gas-diesel dual fuel compression ignition engines in automotive applications: a review**
Hall C. (Illinois Inst. Tech. - États-Unis), Kassa M. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol.148, 2021, Article No 111291, 11 p., doi 10.1016/j.rser.2021.111291
- **Life cycle assessment of mid-range passenger cars powered by liquid and gaseous biofuels: comparison with greenhouse gas emissions of electric vehicles and forecast to 2030**
Ternel C. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Bouter A. (IFPEN, Carnot IFPEN TE), Melgar Sossa J. (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Transportation Research Part D - Transport and Environment, Vol. 97, août 2021, Article No102897, doi 10.1016/j.trd.2021.102897



Maquette : IFPEN
Mise en page : ExeAtelierTypao
Photos : © Adobe Stock, IFPEN, X. - 2206

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2021

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